



Michael Peres Gomes Malina

Licenciado em Ciências da Engenharia Civil

Tendências recentes na consolidação de alvenarias antigas através da técnica de injeção de caldas

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em
Engenharia Civil – Perfil de Construção

Orientador: Luís Gonçalo Correia Baltazar, Professor Auxiliar,
Faculdade de Ciências e Tecnologia
da Universidade Nova de Lisboa

Júri:

Presidente: Professor Doutor Carlos Manuel Chastre Rodrigues

Arguente: Professor Doutor Fernando Farinha da Silva Pinho

Vogal: Professor Doutor Luís Gonçalo Correia Baltazar



FACULDADE DE
CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE NOVA DE LISBOA

Setembro, 2019

Recentes tendências na consolidação de alvenarias antigas através da técnica de injeção de caldas

Copyright © Michael Peres Gomes Malina, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Nova de Lisboa.

A Faculdade de Ciências e Tecnologia e a Universidade Nova de Lisboa têm o direito, perpétuo e sem limites geográficos, de arquivar e publicar esta dissertação através de exemplares impressos reproduzidos em papel ou de forma digital, ou por qualquer outro meio conhecido ou que venha a ser inventado, e de a divulgar através de repositórios científicos e de admitir a sua cópia e distribuição com objectivos educacionais ou de investigação, não comerciais, desde que seja dado crédito ao autor e editor.

Dedicado à minha mãe

Agradecimentos

Em primeiro lugar queria agradecer ao Professor Luís Baltazar, pela oportunidade de realizar esta dissertação, por toda a disponibilidade, esclarecimentos e partilha do conhecimento sobre o tema e ajuda.

Gostaria igualmente de agradecer a todos os docentes que tive o prazer de encontrar desde o início da licenciatura cuja competência me permitiu adquirir os conhecimentos necessários para a realização deste trabalho.

Em terceiro lugar, queria agradecer a todos os amigos e colegas de curso e de faculdade pelo apoio e convivência.

Por fim, agradeço à minha família que me proporcionou este percurso académico e, pela educação e valores transmitidos, assim como à minha namorada pela motivação e paciência.

Em homenagem à minha mãe por todo o apoio e valores que me transmitiu e ao meu amigo Heitor por mostrar como viver a vida da melhor maneira.

Resumo

As alvenarias de pedra fazem parte de uma parcela significativa do património edificado tanto em Portugal como por toda a Europa. No entanto, a alvenaria de pedra é uma solução construtiva que apresenta as fragilidades próprias, o que associado a pouca ou inexistente manutenção culmina, em geral, num avançado estado de degradação. Assim, é essencial proceder a intervenções de conservação e consolidação que melhorem as condições de conforto e segurança para o proveito destes edifícios nos tempos de hoje.

Este trabalho concentra-se numa técnica de consolidação de paredes antigas de alvenaria de pedra através de injeção de caldas. Esta técnica permite restituir ou mesmo melhorar a função estrutural das paredes melhorando as suas características físicas e mecânicas. A injeção de caldas nas alvenarias tem como objetivo restaurar a continuidade e homogeneidade das paredes preenchendo os vazios e fendas que foram aparecendo ao longo do tempo. A consolidação é alcançada desta forma, ligando os diferentes elementos da alvenaria assim como melhorando o comportamento monolítico da alvenaria e, consequentemente, a resistência mecânica de toda a estrutura.

A injeção de caldas em paredes de alvenaria de pedra é uma técnica que pode ser extremamente eficaz na sua consolidação, porém, uma avaliação preliminar à alvenaria tem de ser realizada porque a eficiência da consolidação depende de diversos fatores desde as características físicas e mecânicas dos materiais que se encontram na alvenaria, aos materiais utilizados na formulação da calda e sua compatibilidade química e física com os materiais originais da alvenaria, aos diversos fatores externos tais como a temperatura e pressão de injeção.

O presente trabalho tem como objetivo reunir a informação que se encontra dispersa em artigos científicos, comunicações em congressos, dissertações e teses em

relação ao tema da injeção de caldas como técnica de consolidação de alvenarias antigas. A injeção de caldas é uma técnica muito eficaz, porém, a avaliação do estado de conservação do interior de paredes de alvenaria pode ser difícil de determinar sem o acesso ao interior da parede. As diferentes técnicas de avaliação das paredes de alvenaria antes e após a injeção serão apresentadas e explicadas. De seguida, os diferentes materiais que podem ser utilizados na formulação das caldas de injeção vão ser apresentados indicando o que trazem de positivo e negativo às características em estado fresco e endurecido. Assim, os diferentes ensaios reológicos, mecânicos e físicos serão expostos de forma a apresentar num documento único os principais ensaios que podem ser realizados com caldas de injeção e resultados esperados. Por fim, a influência da temperatura, do tempo de repouso e da pressão de injeção na realização eficaz desta técnica será abordado.

Palavras-chave: alvenaria, caldas de injeção, consolidação, património edificado, reologia, resistência mecânica

Abstract

Old masonries form a big part of the built heritage of Portugal and the whole of Europe. Unfortunately, most heritage buildings are in an advanced state of degradation mostly due to natural aging and lack of maintenance. Thus, it is essential to make interventions in these buildings improving their comfort and safety conditions.

This review provides an overview on the consolidation of old stone masonry walls based on grout injection technique or grouting. This technique makes it possible to restore or even improve the structural performance of such walls by improving their physical and mechanical characteristics. The injection of grout in the masonry core aims to restore the continuity and homogeneity of the old masonry walls filling the voids and cracks that have appeared over time. Consolidation is achieved by connecting the different wall elements and, therefore, improving the mechanical strength of the entire structure.

Grouting is a technique that can be extremely effective in consolidating old buildings, but a pre-injection study must be performed. Its efficiency depends on many factors from the materials that can be found in the wall, to the materials used in the mixture of the grout and their chemical and physical compatibility with the materials in place, to the various external such as temperature and injection pressure.

This work aims to make a literary review on grout injection technique for the consolidation of old stone masonries. Different techniques for evaluating masonry walls before and after injection will be presented and explained. Grout injection is a very effective technique, however, assessing an effective consolidation of masonry walls can be difficult to determine without access to the interior of the wall. Furthermore, the different materials that can be used in the grout will be presented indicating what their

benefits and disadvantages to the fresh and hardened state properties. Thus, the different rheological, mechanical and physical tests will be exposed in order to present in a single document the main tests and measurements that can be performed with grout and expected results. Finally, the influence of temperature, rest time and injection pressure on the effective performance of this technique will be presented.

Keywords: built heritage, consolidation, grout injection, masonry, mechanical strength, rheology

Índice de texto

1. Introdução.....	1
1.1. Motivação.....	1
1.2. Objetivo.....	2
1.3. Estrutura do trabalho	2
2. Alvenarias antigas	5
2.1. Considerações iniciais	5
2.2. Caracterização da alvenaria.....	5
2.3. Função.....	6
2.4. Classificações das alvenarias de pedra	6
2.4.1. Classificação em função da ligação	6
2.4.2. Classificação em função do aparelho	7
2.4.3. Classificação em função dos materiais	8
2.4.4. Classificação em função da secção transversal	8
2.5. Anomalias.....	9
2.6. Técnicas auxiliares de diagnóstico em alvenarias antigas	13
2.6.1. Técnicas de percepção sensorial	14
2.6.2. Técnicas de propagação de ondas elásticas	15
2.6.3. Técnicas de ação mecânica	17
2.6.4. Técnicas de reação químicas	18
2.6.5. Técnica de efeitos elétricos.....	19
2.6.6. Técnicas de análise de vibrações.....	19
2.7. Considerações finais	20
3. Injeção de caldas	22
3.1. Considerações iniciais	22

3.2. Objetivos da técnica.....	22
3.3. Processos de aplicação.....	24
3.3. Exigências funcionais	27
3.4. Ensaio não intrusivo na avaliação da injeção de caldas	28
3.4.1. Propagação de ondas sónicas.....	28
3.4.2. Tomografia sónica	29
3.4.3. Georadar.....	30
4. Constituição de caldas	33
4.1. Ligante.....	33
4.1.1. Caldas inorgânicas	33
4.1.2. Caldas orgânicas	34
4.1.3. Caldas com geopolímeros.....	34
4.2. Adições.....	35
4.2.1. Pozolanas naturais	36
4.2.2. Pozolanas não naturais	37
4.2.2.1. Sílica de fumo	37
4.2.2.2. Escória de alto-forno	37
4.2.2.3. Cinzas volantes	38
4.2.2.4. Cinza de casca de arroz	38
4.2.3. Fibras polipropileno	39
4.2.4. Pó de tijolo	39
4.2.5. Pó de pedra	40
4.3. Água	40
4.4. Adjuvantes	41
4.4.1. Retentor de água.....	41
4.4.2. Superplastificantes	42
4.4.3. Introduzidor de ar.....	42
4.4.4. Acelerador de presa	43
4.4.5. Retardador de presa.....	43
4.4.6. Hidrófugo	43
4.4.7. Acelerador de endurecimento	44
4.4.8. Agente expansivo	44
5. Caracterização e propriedades de caldas no estado fresco	45
5.1. Considerações iniciais	45
5.2. Massa volúmica fresca	45
5.3. Retenção de água.....	46
5.4. Injetabilidade	47
5.5. Estabilidade: avaliação da exsudação e da variação de volume.....	48
5.6. Propriedades reológicas em laboratório	49
5.6.1. Viscosímetro.....	49
5.6.2. Reómetros.....	50
5.7. Propriedades reológicas in situ	51
5.7.1. Teste de fluidez - cone de Marsh	51
5.7.2. Teste de espalhamento	52
5.7.3. Método do perfil de velocidades por ultra-sons - doppler	53

5.8.	Considerações finais das propriedades da calda fresca	54
6.	Caracterização e propriedades de caldas em estado endurecido.....	57
6.1.	Considerações iniciais	57
6.2.	Propriedades mecânicas.....	57
6.2.1.	Módulo de elasticidade.....	57
6.2.2.	Resistência à tração por flexão	58
6.2.3.	Resistência à compressão	59
6.2.4.	Aderência	61
6.2.5.	Resistência aos sais solúveis	64
6.3.	Propriedades físicas	65
6.3.1.	Porosidade aberta.....	65
6.3.2.	Absorção de água por capilaridade.....	66
6.3.3.	Secagem	67
6.3.4.	Termogravimetria	68
6.4.	Considerações finais das propriedades da calda endurecida.....	69
7.	Influência de fatores externos na injeção de caldas	71
7.1.	Considerações iniciais	71
7.2.	Efeito da temperatura	71
7.3.	Efeito do tempo de repouso.....	72
7.4.	Efeito da pressão de injeção.....	73
7.5.	Características do meio poroso	75
7.6.	Considerações finais	78
8.	Conclusão e desenvolvimento futuros.....	79
8.1.	Conclusão.....	79
8.1.1.	Análise das paredes de alvenaria	79
8.1.2.	Técnica de injeção de caldas	80
8.1.3.	Constituição das caldas de injeção	80
8.1.4.	Ensaio às caldas no estado fresco e endurecido	81
8.1.5.	Influência de fatores externos	82
8.2.	Desenvolvimentos futuros.....	82
	Referências bibliográficas.....	84

Índice de figuras

Figura 2.1 Ilustração de paredes de alvenaria	6
Figura 2.2 Alvenaria de pedra argamassada	7
Figura 2.3 Alvenaria de pedra seca	7
Figura 2.4 Parede de alvenaria de aparelho tradicional	7
Figura 2.5 Representação esquemática de paredes e alçados de alvenarias aparelhadas: aparelho rústico (a) e parede de cantaria (b).....	8
Figura 2.6 Representação esquemática dos vários tipos de secções de paredes em alvenaria...	9
Figura 2.7 Representação da influência de um núcleo com fracas características mecânicas numa parede de pano triplo.....	9
Figura 2.8 Representação esquemática do colapso de um pano exterior por desagregação	10
Figura 2.9 Fendilhação numa parede da torre sineira da Catedral de Monza, Itália.....	10
Figura 2.10 Representação esquemática da fluência dos panos exteriores causadas por campos de tensões heterogéneos	11
Figura 2.11 Fissurómetro e comparador de fissuras	14
Figura 2.12 Fissuras verticais por sobrecarga em parede de alvenaria	15
Figura 2.13 Câmara endoscópica	15
Figura 2.14 Disposição dos transdutores no ensaio de ultra-sons	16
Figura 2.15 Exemplo de uma tomografia sónica no Real Collegio em Lucca, Itália	16
Figura 2.16 Ensaio impacto-eco	17
Figura 2.17 Ensaio com macacos planos.....	17
Figura 2.18 Ensaio com dilatómetro	18
Figura 2.19 Ilustração de extracção de carotes (a) Carotagem e (b) carotes recolhidos.....	18
Figura 2.20 Kit de ensaio ao teor em saís	19
Figura 2.21 Exemplo de humidímetro para medir o teor em humidade.....	19
Figura 2.22 Acelerómetro com alta sensibilidade (a) sensor e (b) modo de funcionamento	20
Figura 3.1 Procedimento esquemático para a aplicação da técnica de injeção de paredes de alvenaria	23
Figura 3.2 Padrões de malhas possíveis para a execução de furos	24
Figura 3.3 Representação esquemática da injeção de paredes com caldas por gravidade e manualmente	25

Figura 3.4 Representação esquemática duma instalação para injeção sob pressão	26
Figura 3.5 Exemplo de um sistema de injeção por sucção.....	26
Figura 3.6. Modo de leituras ultrasónicas.....	29
Figura 3.7 Imagem tomográfica	29
Figura 3.8 Aplicação da técnica do georadar numa parede.....	30
Figura 3.9 Representação dum radargrama.....	30
Figura 4.1 Metacaulino.....	36
Figura 4.2 Sílica de fumo	37
Figura 4.3 Cinzas de casca de arroz	39
Figura 4.4 Pó de tijolo.....	39
Figura 4.5 Esquema das diferentes utilizações de calda de cimento em função do rácio à água/ligante.....	41
Figura 4.6 Efeito do superplastificantes na floculação das partículas de uma calda	42
Figura 5.1 Ensaio de retenção de água utilizando um funil de Buchner modificado.....	46
Figura 5.2 Esquema do ensaio de injetabilidade.....	47
Figura 5.3 Ensaio para a avaliação da exsudação.....	48
Figura 5.4 Viscosímetro rotacional de Brookfield e sua representação esquemática	50
Figura 5.5 Gráfico representativo da viscosidade plástica e da tensão de cedência em função da capacidade do reómetro	50
Figura 5.6 Esquema dum cone de Marsh com dimensões.....	52
Figura 5.7 Esquema e execução do método de espalhamento	53
Figura 5.8 Esquema e execução de um mini teste de espalhamento	53
Figura 5.9 Esquema do método de caracterização reológica de uma calda com velocidades ultrassónicas	54
Figura 6.1 Esquema do ensaio de resistência à tração por flexão	58
Figura 6.2 Esquema do ensaio de resistência à compressão	60
Figura 6.3 Resistência à compressão aos 28 dias de provetes com diferentes misturas	61
Figura 6.4 Esquemas das roturas possíveis no ensaio de aderência: a) desligamento na ligação b) pela ligação cola-calda c) pela calda d) pela ligação calda-pedra	62
Figura 6.5 Esquema do ensaio de aderência calda/pedra	63
Figura 6.6 Exemplo dum ensaio para obter a porosidade aberta.....	65
Figura 6.7 Exemplo do ensaio para determinar a absorção de água por capilaridade.....	66
Figura 6.8 Exemplo de curvas de ensaio de termogravimetria em caldas de NHL	68
Figura 7.1 Influência da temperatura e tempo de repouso na injetabilidade de uma calda (a) e a taxa de injetabilidade (b) para caldas com 1,2% de superplastificante e pressão de injeção de 1 bar	72
Figura 7.2 Efeito da temperatura na tensão de cedência e viscosidade plástica de uma calda de cal hidráulica.....	72
Figura 7.3 Efeito da pressão de injeção na pressão total de uma parede	73
Figura 7.4 Efeito da pressão de injeção na tensão de cedência e viscosidade plástica de uma calda de cal hidráulica	74
Figura 7.5 Influência da pressão de injeção na injetabilidade de uma calda com 1,2% de superplastificante e 0 minutos de tempo de repouso a diferentes temperaturas e diferentes pressões	75
Figura 7.6 Esquema representativo das dimensões das maiores partículas passando num poro	77
Figura 7.7 Formação de um entupimento à entrada de um vazio (1) e obstrução do poro (2). 77	

Índice de Tabelas

Tabela 2.1 Tipos de anomalias frequentes, as causas e características em função do tipo de parede	12
Tabela 2.2 Resumo de métodos destrutivos para a avaliação do estado de degradação de alveanrias de pedra	20
Tabela 3.1 Exigências funcionais de uma calda de injeção	27
Tabela 3.2 Resumo de métodos não destrutivos para a avaliação do estado de degradação de estruturas de alvenaria.....	31
Tabela 4.1 Vantagens e desvantagens entre tipos de calda de injeção em paredes de alvenaria	35
Tabela 4.2 Efeitos de adições utilizados em misturas para injeção	40
Tabela 4.3 Efeitos de adição de adjuvantes à mistura	44
Tabela 5.1 Ensaios para a determinação das propriedades da calda fresca	55
Tabela 6.1 Tensão e tipo de rotura em função da calda.....	63
Tabela 6.2 Ensaios para a determinação das propriedades da argamassa endurecida	69
Tabela 7.1 Pressões de injeção encontradas na literatura	74
Tabela 7.2 Condições de penetrabilidade de partículas segundo diferentes autores	76

1. Introdução

1.1. Motivação

A técnica construtiva de alvenaria de pedra de pano múltiplo foi uma solução construtiva intensamente usada em paredes resistente até meados do séc. XX tanto em edifícios de habitação como em monumentos históricos em Portugal como em toda a Europa (Valluzzi et al., 2004). A disponibilidade da pedra como material de construção assim como as características duráveis e sólidas das paredes de alvenaria fez com que esta solução construtiva fosse frequentemente utilizada. As construções em alvenaria de pedra eram bastantes comuns e utilizavam materiais que se encontravam a proximidade do local (Binda et al., 2000).

No entanto, apesar da sua elevada durabilidade, as alvenarias de pedra apresentam fragilidades próprias causadas pela heterogeneidade de materiais e pelas poucas ou inexistentes ligações entre os elementos constituintes da alvenaria. O edificado em alvenaria de pedra encontra-se, em muitos casos, num estado de degradação considerável por falta de manutenção e falta de técnicas de diagnóstico. A identificação destas fragilidades e as soluções apropriadas são essenciais para a conservação do edifício e o melhoramento das condições de conforto, habitabilidade e segurança.

Uma das técnicas mais utilizadas na consolidação destas alvenarias é a injeção de caldas. A injeção de caldas permite melhorar a capacidade resistente das alvenarias antigas. Porém, é uma técnica irreversível daí que seja uma solução que necessite algum trabalho preliminar tanto na identificação das zonas que requerem consolidação como na formulação do material que se vai injetar. Diferentes características das caldas podem ser estudadas e comparadas desde a sua capacidade de injeção em meios porosos à sua resistência mecânica e aderência no seu estado endurecido (Luso, 2012).

A conservação e reabilitação de edifícios tem sido um tema importante na Europa para manter a identidade cultural das cidades europeias. Um melhor conhecimento de técnicas de conservação e reabilitação de edifícios antigos, que na sua maioria são em alvenaria

de pedra, é indispensável para a integridade dos edifícios melhorando o conforto e segurança do habitante.

1.2. Objetivo

No âmbito desta dissertação pretende-se identificar parâmetros, materiais e suas contribuições no desempenho de caldas de injeção, no sentido de se reunir um conjunto de indicadores que facilite o processo de formulação e aplicação de caldas.

Para tal, várias publicações científicas, casos de estudo e documentos académicos são agrupados e analisados com o intuito de reunir e comparar toda a informação obtida em relação a caldas de injeção em paredes de alvenaria num só documento.

Neste sentido são demonstrados os efeitos da adição de diferentes materiais e as suas contribuições nas propriedades das caldas tanto no estado fresco como endurecido. A influência dos tempos de repouso, da temperatura e da pressão de injeção na realização da técnica também igualmente abordados.

Pretende-se também indicar os métodos de avaliação do estado de paredes de alvenaria antes e depois de realizar a injeção da calda. Esta avaliação pode ser feita com recurso a técnicas destrutivas e não destrutivas. Os métodos que serão apresentados variam entre métodos tradicionais e métodos inovadores, de realização simples, a métodos mais complexos e de custos muito baixos a custos bastante elevados.

Assim, o objetivo deste trabalho é compilar informação necessária para a execução de uma injeção de caldas desde o estudo preliminar do edifício de alvenaria ao trabalho posterior passando pela boa execução da técnica de injeção à boa escolha dos materiais a utilizar.

1.3. Estrutura do trabalho

O presente trabalho encontra-se dividido em sete capítulos incluindo este capítulo de introdução.

O segundo capítulo caracteriza as alvenarias antigas classificando as paredes das diversas formas possíveis em função dos materiais à sua organização. De seguida, identifica-se as patologias mais comuns neste tipo de solução construtiva e as suas causas prováveis. Por fim, as diferentes técnicas de avaliação do estado de alvenarias serão identificadas.

O terceiro e quarto capítulo dedica-se à constituição das caldas de injeção indicando diferentes materiais possíveis de serem incorporados na formulação de uma calda e a influência que estes têm nas propriedades da calda.

No quinto e sexto capítulo apresentam-se os procedimentos e ensaios experimentais para as caldas no seu estado fresco e endurecido. De que forma a formulação da calda influencia as suas propriedades reológicas, físicas e mecânicas.

No sétimo capítulo, a influência de fatores externos nas propriedades das caldas é analisada. Ou seja, de que forma o tempo de repouso, a temperatura e a pressão de injeção influenciam a performance das caldas de injeção.

Por fim, apresentam-se as conclusões obtidas através deste trabalho e algumas sugestões para possíveis desenvolvimentos futuros.

2. Alvenarias antigas

2.1. Considerações iniciais

As paredes em alvenaria de pedra são elementos de maior importância em edifícios antigos por se tratarem de elementos índole estrutural, ou seja, as cargas verticais eram suportadas pelas alvenarias. Os edifícios anteriores à era do betão armado (anteriores séc. XX) eram essencialmente erguidos com alvenaria de pedra ou tijolo ligados entre si com algum tipo de argamassa. Assim sendo, a sua manutenção tanto exterior como interior é de grande importância para as suas funções estruturais.

Neste capítulo são abordadas as paredes de alvenaria, as anomalias que estas podem evidenciar, a importância da sua manutenção e as várias técnicas de diagnóstico.

2.2. Caracterização da alvenaria

Pode definir-se alvenaria como um conjunto de elementos de dimensão variada (blocos de pedra, terra ou cerâmicos) sobrepostos e arrumados, ligados ou não por argamassa, formando paredes, pontes, fundações ou muros. Quando esse conjunto sustenta a construção, denomina-se por alvenaria estrutural (Branco, et al., 2014a). Assim, os elementos construtivos formam panos ou paramentos que são superfícies exteriores que formam uma parede como se pode ver na Figura 2.1.

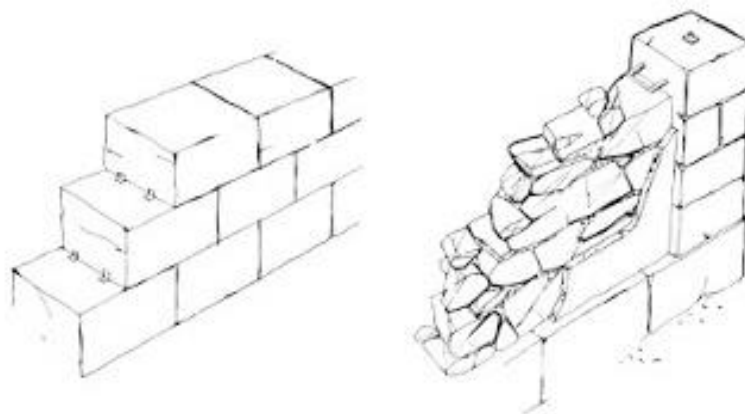


Figura 2.1 – Ilustração de paredes de alvenaria (W1)

2.3. Função

As paredes de alvenaria podem ter vários desígnios. O primeiro, especialmente para construções antigas, é de ter uma função estrutural. Ou seja, paredes de alvenaria contribuem para a estabilidade de um edifício sendo solicitados a ações verticais e horizontais. As ações verticais são gravíticas, o peso próprio e o peso da estrutura. As ações horizontais podem ser as ações sísmicas, vento ou mesmo ações físicas (choque de um veículo por exemplo). Paredes resistentes denominam-se de “mestras”, podendo ser paredes de fachada (frente e tardo), empenas ou interiores (Pinho, 2000). O segundo desígnio das paredes de alvenaria é de proteção contra elementos exteriores, ou seja, servem de barreira à água, vento e temperaturas extremas. Pode-se considerar também como elemento protetor de um espaço interior (indivíduos e bens). A terceira e última função é de separação física de espaços. Estas paredes interiores são assim paredes de compartimentação

2.4. Classificações das alvenarias de pedra

As paredes de alvenaria de pedra podem ser classificadas em função da ligação, do aparelho, dos materiais ou então em função da secção transversal.

2.4.1. Classificação em função da ligação

A classificação em função da ligação, ou seja, a forma como as alvenarias são ligadas entre elas, pode ser de dois tipos (Casella, 2003):

- Alvenaria de pedra argamassada ordinária é constituída por pedras irregulares (xisto, granito, ou outros) ligadas entre si por uma argamassa e, usualmente, são revestidas por uma reboco como se pode ver na Figura 2.2.



Figura 2.2 Alvenaria de pedra argamassada (W2)

-Alvenaria de pedra seca é composta somente de pedras sem argamassa a fazer a ligação (figura 2.3.). É uma técnica que surgiu pela escassez de cal na zona da construção e devido ao custo mais económico (Casella, 1998).



Figura 2.3. Alvenaria de pedra seca (W3)

2.4.2. Classificação em função do aparelho

-Tradicional constituída de pedras toscas, irregulares em forma e dimensões, ligadas por uma argamassa (Casella, 1998, 2003) como se pode ver na figura 2.4.



Figura 2.4 Parede de alvenaria de aparelho tradicional (W4)

-Aparelhada composta de pedras irregulares aparelhadas numa das faces e assentes em argamassa (parede de aparelho rústico), figura 2.5 (a) ou pedras com as faces devidamente aparelhadas geralmente de grandes dimensões e com formas geométricas definidas assentes com argamassas ou não (parede de cantaria), figura 2.5 (b).

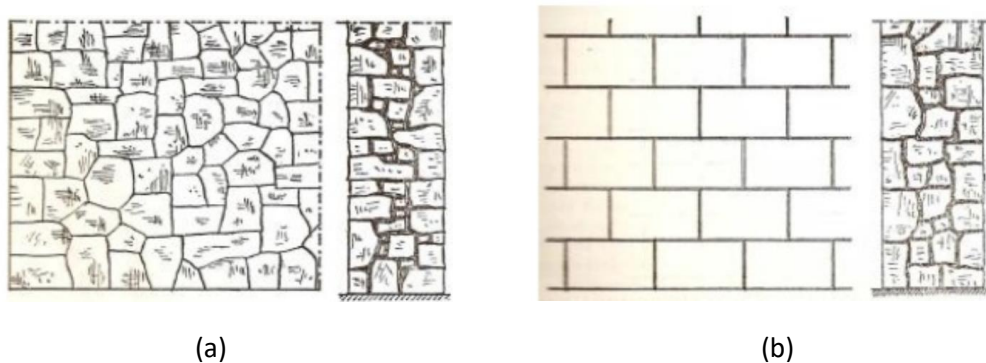


Figura 2.5. Representação esquemática de paredes e alçados de alvenarias aparelhadas: aparelho rústico (a) e parede de cantaria (b)

2.4.3. Classificação em função dos materiais

As paredes são usualmente compostas de mais do que um material. Podem ser construídas com terra moldada denominando-se de paredes de adobe. Podem ser constituídas de diferentes tipos de alvenaria como de tijolo, pedras ou de materiais mistos como alvenaria e cantaria (pedra), pedra e tijolo ou alvenaria com madeira. Os elementos constituintes da alvenaria são ligados entre si com argamassas ou não, estas argamassas podem ser principalmente compostas de argila, cal ou cimento. Os panos centrais das alvenarias eram geralmente compostos de terras argilosas misturadas com areia, entulho ou pedra de menor dimensão que se encontrassem nas imediações. Assim, é comum este pano central com material de fraca qualidade se degradar mais rapidamente que os panos exteriores aumentando o número e volume dos vazios diminuindo a capacidade resistente da parede.

2.4.4. Classificação em função da secção transversal

A classificação em função da secção transversal traduz-se pelo número de panos que compõem a parede.

- Pano simples é uma parede composta de um paramento em único com rebocos ou não (figura 2.6. (a)).
- Pano duplo é composto de dois panos de alvenaria separados por uma junta vertical seca ou com uma argamassa. Os dois panos que compõem este tipo de parede podem ser ligados por pedras que sobrepõem ligeiramente o pano oposto (figura 2.6. (b)).
- Pano triplo é composta, como o nome indica, por três panos dos quais os exteriores são de alvenaria de pedra e o pano interior é composto de um material de fraca qualidade (entulho, argamassa e terra) com uma espessura significativa de 1 metro ou mais, figura 2.6. (c).

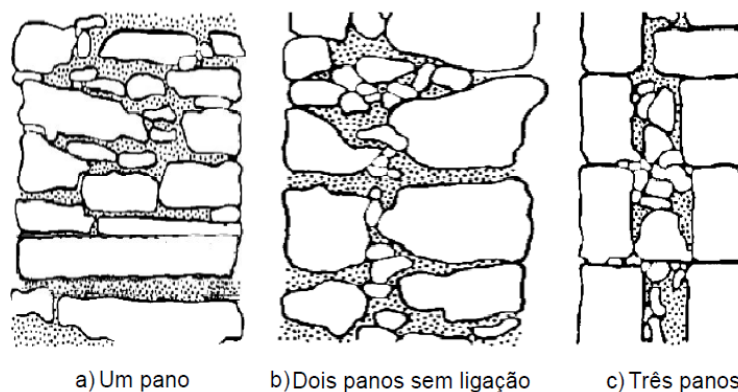


Figura 2.6. Representação esquemática dos vários tipos de secções de paredes em alvenaria (Pinho, 2008)

2.5. Anomalias

As anomalias em paredes de alvenaria de pedra podem-se distinguir em dois grupos: o primeiro relacionado com o comportamento estrutural e o segundo com o comportamento material. As anomalias, no entanto, costumam ser provocadas por uma combinação dos dois grupos.

As principais anomalias em alvenarias de pedra dependem da sua fraca resistência à tração, consequência da fraca resistência mecânica das argamassas. A segunda anomalia mais comum acontece em paredes de pano duplo ou triplo por causa do núcleo central. O núcleo é frequentemente composto de material incoerente e mal distribuído traduzindo-se na existência de vazios. Em consequência, a resistência à compressão da parede é comprometida distribuindo as tensões de forma não uniforme expulsando ou deformando os panos exteriores (Roque, 2002), como se pode ver na figura 2.7. Consequentemente, fenómenos de esmagamento são propícios a acontecer resultado da redistribuição das cargas e da modificação do equilíbrio estrutural.

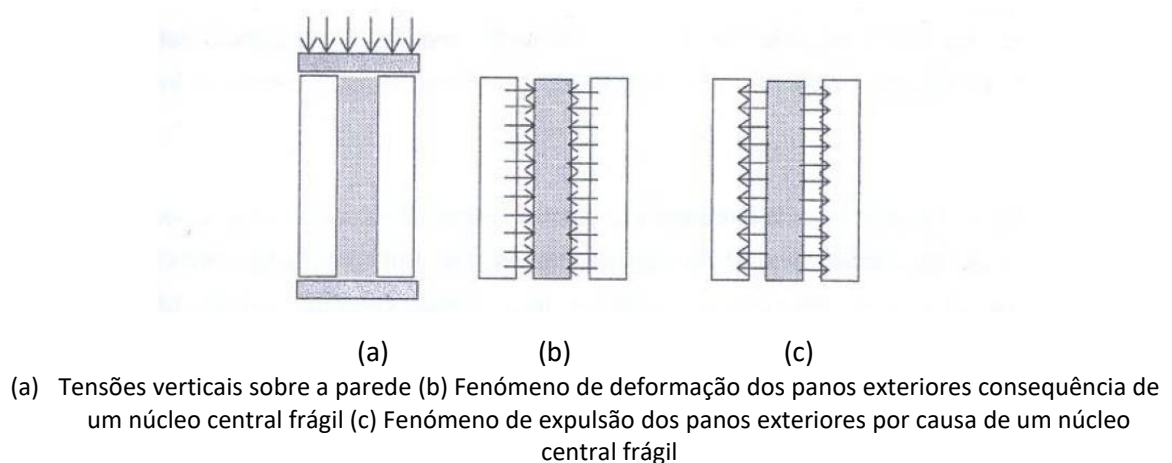


Figura 2.7. Representação da influência de um núcleo com fracas características mecânicas numa parede de pano triplo (Valluzzi, 2000)

A ação sísmica é uma das ações que pode provocar anomalias importantes nas paredes de alvenaria. Sendo que a ação sísmica pode provocar movimentos horizontais que, combinado com a fraca resistência das paredes à tração, causa o aparecimento de fendilhações.

Em relação aos materiais que compõe as paredes antigas, pedras, argamassas e eventualmente materiais metálicos ou de madeira, os problemas que podem surgir têm um impacto negativo do conjunto dos materiais. Vários fenómenos de deterioração física (variações de temperatura, fogo, gelo-degelo, presença de água), deterioração química (cristalização de sais, corrosão de materiais metálicos) e deterioração biológica (micro-organismos, plantas) causam o aparecimento de fissurações, fendilhações o que acelera fenómenos de desagregação (Luso, 2012) exemplificado na figura 2.8.

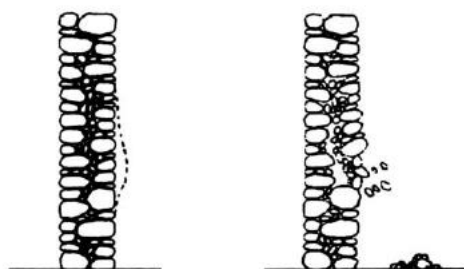


Figura 2.8. Representação esquemática do colapso de um pano exterior por desagregação (Binda et al. 2000)

A fendilhação é a anomalia mais frequente em paredes, caracterizada pelo aparecimento de fissuras e fendas (figura 2.9), sendo que a diferença entre a fissura e a fenda é a dimensão da abertura. A fissura pode ser considerada como tal para uma abertura menor que 0,7 mm enquanto que uma fenda será maior. Pode ter várias causas, mas a mais frequente é de movimentos diferenciais da estrutura que podem ser causadas por sismos ou assentamentos das fundações entre outras. Assim, as deformações de cada material e da sua localização provocam incompatibilidades traduzindo se no surgimento de tensões que podem ultrapassar a resistência do material que fissura.

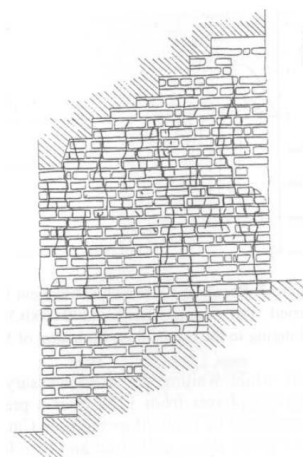
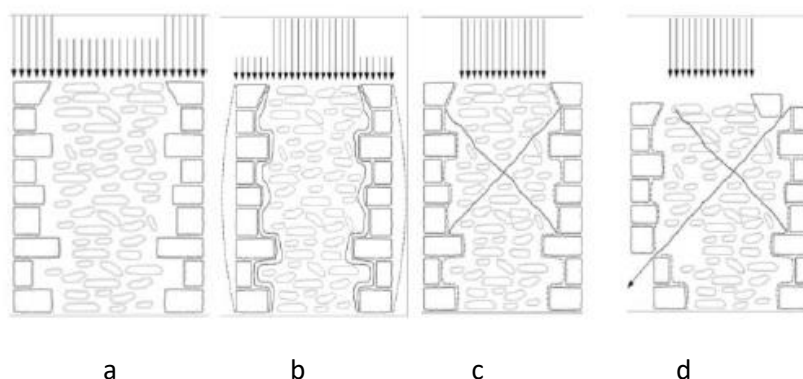


Figura 2.9. Fendilhação numa parede da torre sineira da Catedral de Monza, Itália (Binda et al., 1999)

Outra patologia frequente em paredes de alvenaria antigas é provocada pela fluência. É um fenómeno frequente em paredes de pano triplo e explica-se pelas diferentes rigidezes dos diferentes panos. Inicialmente, quando a parede é construída, as cargas verticais de compressão são suportadas por toda a secção da parede. Com o passar do tempo, os panos exteriores têm tendência a encurtar por encurvamento (devido fluência) ao mesmo tempo que o pano interior perde capacidade resistente à compressão pelos fenómenos de deterioração (erosão, lixiviação, etc.). O encurtamento dos panos exteriores traduz se fisicamente com o deslocamento do campo de tensões para o núcleo central representado na figura 2.10. Este fenómeno é ainda mais acentuado se houver falta de elementos horizontais que liguem os panos exteriores da parede. Acontece assim um aumento das tensões nos panos exteriores que provoca a degradação dos mesmos e podendo provocar a separação de um dos panos.



a. Campo de tensões inicial b. encurtamento dos panos exteriores por encurvamento c. deslocamento do campo de tensões para o núcleo da parede d. aparecimento de mecanismos de falha

Figura 2.10. Representação esquemática da fluência dos panos exteriores (Gemert et al. 2015) causadas por campos de tensões heterogéneos

Por fim, um dos maiores causadores de anomalias e aceleração da degradação de paredes em alvenaria de pedra é a acção da água tanto na sua forma líquida como em forma de vapor. A entrada de água em estruturas antigas é facilitada pela grande porosidade dos materiais utilizados, pelas juntas de argamassa e pelas fissuras e fendas que eventualmente aparecem (Collepari, 1990).

A movimentação da água acontece essencialmente por acção de forças de sucção capilar. As águas provenientes do solo podem trazer consigo sais e outros elementos que provocam a deterioração química e mecânica das argamassas fragilizando a estrutura interna e as ligações entre os diferentes panos. A infiltração da água das chuvas pode criar zonas de humidade que promove a degradação mais acelerada da parede.

A presença de água pode eventualmente provocar fenómenos de gelo-degelo, cristalização de sais e eflorescências (Valluzzi, 2000) aumentando significativamente o volume dos sais que se encontram nos poros. O aumento de volume traduz se no aparecimento de fendas e fissuras aumentando a quantidade de água que entra funcionando com um ciclo que promove a desagregação dos materiais que compõe a parede.

Anomalias nas redes prediais de abastecimento de água e drenagem de águas residuais é outra causa comum no aparecimento de humidades nas paredes. A rotura de tubagens em

edifícios antigos são acontecimentos inevitáveis e provocam o aparecimento de manchas de humidade promovendo o desenvolvimento de fungos e bolores assim como eflorescências causadas pela composição das águas de esgoto (presença forte de nitratos).

A presença de água é inevitável em paredes de alvenaria exteriores. A espessura da parede pode permitir que a humedificação desta no Inverno não provoque anomalias no paramento interior (fungos e bolores) sendo depois seca no verão. Porém, a água não deixa de ser o fator principal do aparecimento de anomalias nas paredes desde ao aumento de vazios tanto em número como em volume pela desintegração e lavagem das argamassas (Jeffer, 2001) à promoção de reações químicas com o transporte de componentes (criptoflorescências, eflorescências, etc.) (Collepari, 1990). A ação da água, em suma, promove a desagregação da parede tendo consequências na sua capacidade mecânica, de proteção aos elementos e na sua função estética.

A seguinte tabela resume as principais anomalias em função do tipo de parede e as causas e características das anomalias.

Tabela 2.1 Tipos de anomalias frequentes, as causas e características em função do tipo de parede (Pinho, 2000)

ELEMENTO	TIPO DE ANOMALIA	CAUSAS E CARACTERÍSTICAS
PAREDES DE COMPARTIMENTAÇÃO	Abaulamentos e esmagamentos	<ul style="list-style-type: none"> • Acréscimo de cargas • Assentamentos diferenciais • Redistribuição de cargas e/ou ocorrência de fendilhação nas paredes resistentes • Modificação das condições de equilíbrio estrutural
	Ação da água	<ul style="list-style-type: none"> • Encontro com paredes resistentes exteriores • Anomalias em redes de abastecimento de águas e esgotos
	Fendilhação	<ul style="list-style-type: none"> • Movimentos diferenciais relativos da estrutura • Assentamentos diferenciais das fundações • Retração dos panos de parede • Flexão excessiva dos pavimentos
PAREDES RESISTENTES	Desagregação	<ul style="list-style-type: none"> • Progressão e/ou agravamento da fendilhação • Variações extremas de temperatura entre calor e frio • Ação da água (da chuva, por capilaridade, por condensação) • Choques acidentais e por vandalismo (mais grave ao nível do rés de chão) • Destruição de revestimentos e acabamentos

Tabela 2.1 (Continuação) Tipos de anomalias frequentes, as causas e características em função do tipo de parede (Pinho, 2000)

ELEMENTO	TIPO DE ANOMALIA	CAUSAS E CARACTERÍSTICAS
PAREDES RESISTENTES	Esmagamento	<ul style="list-style-type: none"> • Fenómeno localizado (pouco frequente) • Principalmente devido a cargas concentradas excessivas, como apoio de vigas, cargas maiores que previstas • Zonas de contato entre vigas de madeira e a alvenaria, em que a torção devido à secagem da madeira origina grandes compressões • Em edifícios próximos de obras novas com muros de suporte ancorados, as pressões ascendentes transmitem-se às fundações e posteriormente às paredes
	Fendilhação	<ul style="list-style-type: none"> • Frequentemente junto a aberturas ou na ligação de paredes ortogonais • Assentamentos diferenciais, podendo identificar as zonas onde ocorrem • Agravada na presença de água • Agravada na ausência de lintéis superiores adequados • Ação de arcos de descarga (impulsos laterais) provocando fendas horizontais • Abatimento de arcos de descarga • Ação de sismos • Deficiente isolamento térmico (em terraços) • Deficiente funcionamento de asnas de cobertura
	Ação da água	<ul style="list-style-type: none"> • Ascensão de água por capilaridade, criando um percurso preferencial (nas argamassas de assentamento), diluindo saís, até à sua deposição superficial • Entradas de água pela cobertura • Rutura de tubagens • Manchas de humidade em tetos e paredes • Habitualmente em paredes atravessadas por redes de água de abastecimento ou de esgotos
	Ação de agentes biológicos e climáticos	<ul style="list-style-type: none"> • Maior gravidade no apodrecimento de elementos de madeira nas paredes resistentes, devido a fungos e insetos • Variação sazonal da humidade

2.6. Técnicas auxiliares de diagnóstico em alvenarias antigas

Existem diversas técnicas para avaliar os elementos e materiais que constituem as alvenarias antigas. As técnicas mais desejáveis são as não destrutivas que podem ser feitas in situ. Porém, muitas das técnicas de avaliação terão de ser intrusivas. Uma descrição histórica do edifício pode ser de grande importância, quando, por quem e em que condições foi construído pode indicar os métodos de construção, os materiais utilizados, intervenções e

reparações que tenham sido efetuadas (Icomos, 2004). Esta informação em correlação com a experiência do técnico de avaliação pode ser da maior importância e ajudar na escolha dos ensaios mais importantes que serão efetuados para uma boa e rigorosa avaliação do edifício.

As técnicas podem-se qualificar de diversas formas (Cóias, 2006, Paiva, 2005) em função do lugar onde se realiza a técnica (in situ ou em laboratório), a dimensão da destruição do elemento para realizar o ensaio (não destrutiva, parcialmente destrutiva ou destrutiva), o princípio que é utilizado (sensorial, mecânico, térmico, químico, eletroquímico, elétrico, magnético, eletromagnético, ultrassónico, radioativo, etc.), em função dos resultados obtidos (aderência ou permeabilidade por exemplo), o elemento em estudo.

As técnicas vão ser apresentadas das mais simples às mais complexas em função dos princípios de funcionamento.

2.6.1. Técnicas de percepção sensorial

Este primeiro grupo é o método de avaliação mais simples: a observação. Uma visualização física do local em análise é a técnica de avaliação que pode trazer o maior número de informação. A eficácia desta técnica depende obviamente da experiência de quem a faz e influencia os ensaios que poderão ser feitos no futuro.

Para além da visualização, o olfato e a sonoridade podem ser sentidos importantes para avaliar. O olfato pode dar informação em relação a problemas de fungos e bolores relacionados com humidade ou fugas de água e o ouvido pode nos indicar eventuais zonas de vazios dentro do elemento pela percussão e os sons transmitidos (Cóias, 2006).

Para complementar os sentidos, a fotografia permite uma avaliação do dano assim como dimensionar e localizar eventuais fendas e fissuras. Comparadores de fissuras e fissurómetros (figura 2.12) permitem quantificar instantaneamente a abertura das fendas e fissuras ou avaliar eventuais movimentos do elemento e das fissuras ao longo do tempo. O desenho esquemático da fissuração pode ajudar a compreender os esforços que a parede está a resistir (Cóias, 2006). A figura 2.7 exemplifica a fissuração devida a esforços verticais numa parede de alvenaria.

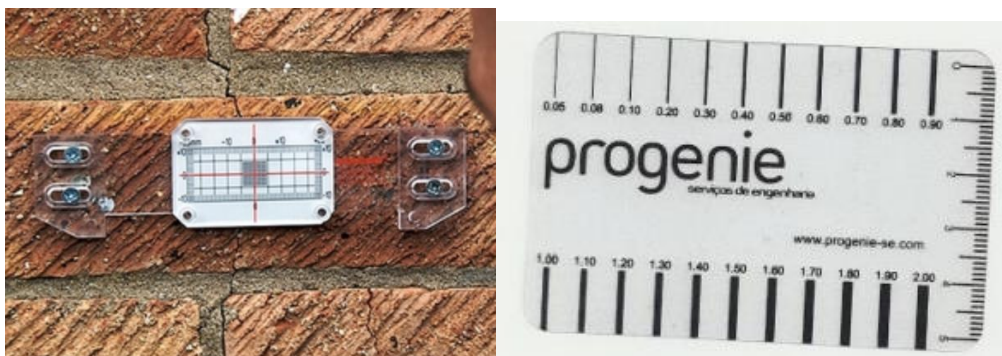


Figura 2.11 Fissurómetro e comparador de fissuras (W9, W10)

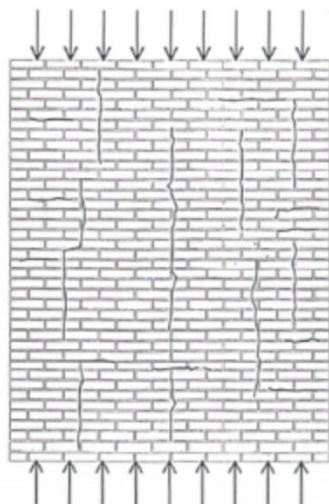


Figura 2.12 Fissuras verticais por sobrecarga em parede de alvenaria

Por fim, pode ser utilizada uma câmara boroscópica (figura 2.13) que, por sua vez, já é um ensaio intrusivo não destrutivo que permite visualizar o interior da parede com a penetração de uma câmara de pequeno diâmetro num furo previamente executado na alvenaria.



Figura 2.13 Câmara endoscópica (W11)

2.6.2. Técnicas de propagação de ondas elásticas

As técnicas de propagação sónica são ensaios não destrutivos especialmente importantes em estruturas antigas. Os ensaios baseiam-se na deteção, medição e análise de ondas elásticas. São muito eficazes na deteção de incoerência (vazios, etc.) no interior de elementos do edifício (Cóias, 2006).

O ensaio ultra-sónico (Valluzzi et al. 2009, Cóias, 2006) permite obter as características mecânicas, a homogeneidade do elemento e a presença de fissuras e fendas interiores. É um ensaio possível de se fazer em laboratório com provetes com pequena escala daí a propagação de ondas ultrassónicas. O ensaio permite determinar a velocidade de propagação de impulsos ultrassónicos entre dois pontos onde se colocam transdutores (figura 2.14). A colocação dos

transdutores pode ser um pouco intrusiva com a necessidade, em certos casos, de fazer furos no elemento para introduzir os transdutores.



Figura 2.14 Disposição dos transdutores no ensaio de ultra-sons (W46)

O ensaio sónico mede o tempo de propagação mas duma onda sonora e sabendo a distancia entre os transdutores é possível determinar a velocidade de propagação da onda. É um ensaio que permite detetar áreas com fraca resistência mecânica, defeitos e vazios no interior das paredes de alvenaria e, em falta de informação, indica os diferentes materiais utilizados. Difere-se do ensaio ultra-sónico por se fazer *in situ* com paredes de alvenaria à escala.

A tomografia sónica resulta dos ensaios sónicos e ultra-sónicos. Por meio de um software adequado e medindo a velocidade de propagação de um impulso sónico ao longo de várias direções, obtém-se um mapa de velocidades pormenorizado, permitindo a identificação das heterogeneidades existente na parede toda e/ou de zonas localizadas.

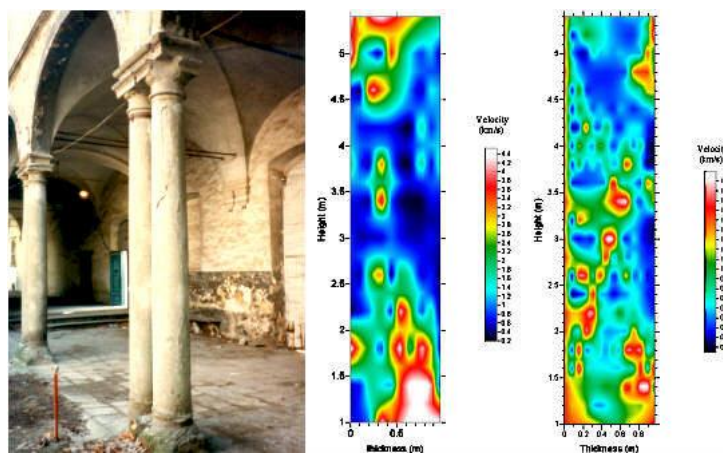


Figura 2.15 Exemplo de uma tomografia sónica no Real Collegio em Lucca, Itália (Maierhofer et al., 2003)

O ensaio impacto-eco tem o mesmo princípio que os ensaios anteriores medindo a reflexão de ondas sónicas e ultra-sónicas no elemento (figura 2.15). Obtém-se a mesma informação em relação a vazios, defeitos, que as técnicas anteriores só que funciona com um martelo, um acelerómetro e um dispositivo recetor.



Figura 2.16 Ensaio impacto-eco (W34)

2.6.3. Técnicas de ação mecânica

Os resultados das técnicas sensoriais e não intrusivas de propagações de ondas elásticas permitem escolher os ensaios mais intrusivos que devem ser feitos para uma boa avaliação do estado da parede (Lombillo, et al. 2013, Córias, 2006).

O ensaio com macacos planos permite determinar o estado de tensão num ponto de uma parede com o ensaio simples. Resumidamente, introduz-se um macaco plano horizontalmente numa parede medindo se alteração do estado de deformação provocada pelo rasgo executado para introduzir o macaco e determina-se de seguida a pressão necessária para repor a parede no estado de deformação inicial (figura 2.16). O mesmo ensaio com a introdução de dois macacos planos (chamado ensaio duplo) paralelamente entre eles permite obter o módulo de elasticidade e a capacidade resistente. É um ensaio intrusivo que provoca alguns danos no elemento e que não é de fácil execução em alvenaria de pedra não aparelhada (Miranda, 2011).



Figura 2.17 Ensaio com macacos planos (W12)

O ensaio com dilatómetro (figura 2.18) em alvenarias funciona com a colocação de uma sonda num furo previamente feito. Esta sonda exerce pressão do material à volta do furo por pressão hidrostática obtendo como resultados o módulo de elasticidade e o coeficiente de Poisson do elemento. É um ensaio destrutivo que pode ser um bom complemento ao ensaio duplo com macacos planos no interior de uma parede dupla ou de pano triplo.



Figura 2.18 Ensaio com dilatômetro (W13)

Por fim, a carotagem funciona com a execução de perfurações na parede retirando carotes que serão posteriormente analisados em laboratório (figura 2.19). É um ensaio que permite saber a composição e estado de degradação assim como as características de deformabilidade (módulo de Young e o coeficiente de Poisson) da parede analisada.

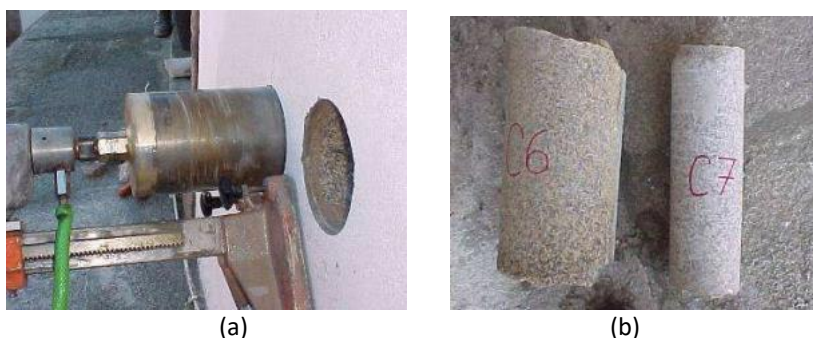


Figura 2.19 Ilustração de extração de carotes: (a) carotagem e (b) carotes recolhidos (W13)

A extração de carotes deve ser realizada nos pontos mais representativos da estrutura e nas zonas mais degradadas para conhecer o estado real do paramento. O estudo dos carotes em diferentes zonas da parede permite aprofundar o conhecimento da parede desde os tipos de materiais utilizados às propriedades mecânicas e físicas (Correia, 2011) permitindo conhecer a granulometria dos materiais constituintes da parede, o índice de vazios médio do material do núcleo, a capacidade de absorção de água por capilaridade. Assim, a capacidade de escoamento da calda no interior da parede pode ser conhecida pela capacidade de absorção de água do núcleo.

2.6.4. Técnicas de reação químicas

Ensaio químicos podem ser feitos tanto em laboratório como em in situ. Obviamente que os ensaios em laboratórios são mais exaustivos, mas os ensaios in situ têm a vantagem de serem expeditos.

O ensaio ao teor de sais pode ser feito diretamente com um kit de campo ou com fitas colorimétricas (figura 2.20). O kit de campo utiliza um espectrofotômetro para determinar as

concentrações de sulfatos e cloretos. As fitas colorimétricas são utilizadas comparativamente com uma escala de referência de cores indicando assim a concentração dos sais. São técnicas fáceis, rápidas e eficazes que permitem analisar eflorescências e ter uma ideia de onde vêm as anomalias e prováveis consequências (degradação e concentração de vazios).



Figura 2.20 Kit de ensaio ao teor em sais (Brito, 2004)

A medição de humidade no interior de paredes in situ pode ser feita quimicamente com uma reação química do material que compõe a parede e o carbonato de cálcio. O resultado é a humidade relativa que se encontra no material.

2.6.5. Técnica de efeitos elétricos

A medição do teor de humidade, principalmente em elementos de revestimento, pode ser obtida com sinais elétricos com a utilização de um humidímetro (figura 2.21). Ao posicionar o equipamento na superfície em estudo ou inserindo as sondas na parede é possível medir instantaneamente o teor em humidade confirmando eventuais suspeitas de problemas de humidade.



Figura 2.21 Exemplo de humidímetro para medir o teor em humidade (W14)

2.6.6. Técnicas de análise de vibrações

A avaliação do comportamento dinâmico de um edifício pode por vezes ser importante para perceber a sua capacidade de resistência a vibrações e movimentos da estrutura. É um ensaio mais indicado para quando o edifício se encontra na proximidade de vias com elevado tráfego de veículos pesados ou caminhos de ferro.

Para a análise e monitorização de vibrações em estruturas pode se utilizar um sistema de acelerómetros com alta sensibilidade a vibrações registrando todas as medições em memória (Figura 2.22). É um trabalho personalizado que necessita de um técnico especializado para a montagem do ensaio e o estudo dos resultados.

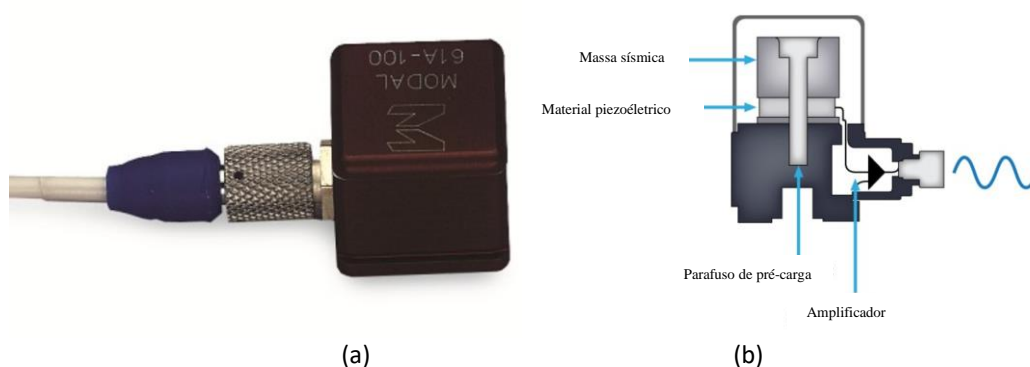


Figura 2.22 Acelerómetro com alta sensibilidade (a) sensor e (b) modo de funcionamento (W15)

Tabela 2.2 Resumo de métodos destrutivos para a avaliação do estado de degradação de alvenarias de pedra

TIPO DE ENSAIO	ADEQUAÇÃO	DESVANTAGENS
CAROTAGEM	**	<ul style="list-style-type: none"> • necessidade de executar perfurações na parede • a avaliação é pontual • número reduzido de amostras • carotes, por vezes, desfragmentadas
MACACOS PLANOS	****	<ul style="list-style-type: none"> • necessidade de efetuar rasgos na estrutura • dificuldade de abertura dos rasgos para introdução dos macacos, especialmente em alvenaria de pedra e de junta irregular • avaliação pontual
CÂMARA ENDOSCÓPICA	***	<ul style="list-style-type: none"> ▪ necessidades de executar perfurações na parede, embora de pequeno diâmetro ▪ avaliação é pontual ▪ dificuldade na interpretação das imagens obtidas
DILATÓMETRO	****	<ul style="list-style-type: none"> ▪ necessidade de efetuar aberturas na estrutura ▪ avaliação pontual
*POUCO ADEQUADO A **** BASTANTE ADEQUADO		

2.7. Considerações finais

Depois de efetuada uma inspeção à alvenaria de pedra, procede-se ao diagnóstico e prescrição das soluções de conservação mais adequadas. As técnicas de reabilitação podem ser de diferentes tipos, desde trabalhos de limpeza e proteção, a trabalhos de reparação não-estrutural ou estrutural ou mesmo trabalhos de consolidação (Branco et al., 2014).

Os trabalhos de limpeza e proteção têm como objetivos a eliminação ou minimização da ação de agentes de deterioração, a aplicação de tratamentos superficiais de proteção e a

manutenção eficaz e regular. Os métodos podem ser mecânicos (limpeza mecânica ou micro-jacto de precisão de partículas abrasivas), químicos (biocidas, pastas gelatinosas dissolventes, etc.) ou outros métodos.

Os trabalhos de reabilitação não-estrutural de paredes de alvenaria estão maioritariamente relacionados para problemas de humidades ascendentes ou de condensação. Para as humidades ascendentes, os trabalhos podem ser de execução de valas drenantes a barreiras químicas ou mecânicas. Para as humidades de condensação, é necessário baixar a humidade relativa reforçando a temperatura ambiente, a ventilação ou o isolamento térmico. A reparação de juntas e fissuras também pode ser incluída nestes trabalhos não estruturais. Estes trabalhos são muito importantes para a durabilidade do edifício assim como o seu desempenho controlando a necessidade de ter de realizar trabalhos de reforço ou reparação estrutural.

Os trabalhos de consolidação estrutural são tendencialmente mais intrusivos e podem classificar-se em função do grau de intrusão, ou seja, se os trabalhos se realizam no interior ou à superfície do elemento. Os trabalhos de consolidação têm como objetivo melhorar as características mecânicas dos elementos existentes sem piorar as características higrotérmicas. A consolidação pode ser feita no núcleo da alvenaria restabelecendo a coesão desta ou a nível do pano interior com a injeção de caldas, objeto de estudo desta dissertação. Outro método para consolidar estruturalmente uma parede perdendo, porém, as suas características estéticas de origem é a utilização de rebocos armados. Para paredes num estado de degradação menores onde se encontrem algumas fissuras e fendas, os trabalhos de consolidação podem ser feitos preenchendo as fendas. Em último caso, pode se proceder à substituição dos elementos mais degradados (alvenarias em pedra ou cerâmicas).

Em caso de perda das características mecânicas das paredes de alvenaria, pode-se proceder a outras técnicas de reforço estrutural. Os conectores de confinamento da alvenaria permitem uma melhor ligação dos diferentes panos que compõe a parede. Os conectores podem ser metálicos ou de materiais fibrosos.

3. Injeção de caldas

3.1. Considerações iniciais

A injeção de caldas é uma técnica de reforço estrutural utilizado especialmente em alvenarias antigas. É uma técnica irreversível mas, se bem feita, preserva a integridade da parede e os resultados são invisíveis exteriormente.

3.2. Objetivos da técnica

Os objetivos principais da injeção de caldas em paredes de alvenaria antigas são a melhoria das propriedades mecânicas aumentando a resistência mecânica à compressão e flexão (com o preenchimento dos vazios e das fendas) e homogeneizando a capacidade de carga dos três panos que compõe a parede de alvenaria. A injeção permite também uma melhor ligação entre os diferentes panos da parede.

Existem porem alguns limites na utilização da técnica de consolidação por injeção de caldas. A primeira relaciona-se com a dificuldade em saber ao certo o estado do pano interior numa parede sem poder visualizar com os próprios olhos. Ou seja, fica muito complicado perceber a distribuição dos vazios e a dimensão destes. Torna-se importante saber esta informação porque o tipo e a quantidade de calda a usar, especialmente a dimensão das partículas que compõe esta depende da dimensão dos vazios. A utilização de partículas com um diâmetro mais pequeno que espaços de vazios relativamente grandes pode provocar segregação que diminui as propriedades resistentes que a calda é suposta trazer. Ao mesmo tempo, caldas compostas de partículas com um diâmetro maior que os canais de ligação de vazios podem obstruir a interligação dos vazios o que corresponde a uma injeção parcial. Outro problema tem a ver com o material que se encontra no pano interior que é desconhecido. Não sabendo ao certo o que se encontra no interior, nomeadamente o volume de vazios, podem ocorrer fenómenos de segregação e retração elevadas das caldas devido a forte absorção de água de constituição pelos materiais existentes. Por fim, para eliminar a presença de ar nos vazios obtendo ao mesmo tempo uma injeção total, é necessário injetar

com pressões adequadas (referido no Cap.6.10) evitando a instabilização da parede retirando totalmente o ar das fendas e dos vazios (Binda et al., 2006).

Estas desvantagens na técnica de injeção de caldas em paredes de alvenaria antigas podem ser controladas e minimizadas com uma diversidade de ensaios em laboratório e in situ. Segundo Binda (2006), a seguinte metodologia (figura 3.1) deve ser aplicada na injeção de caldas em paredes de alvenaria. Este processo da metodologia permite aumentar a probabilidade de sucesso da injeção de caldas.

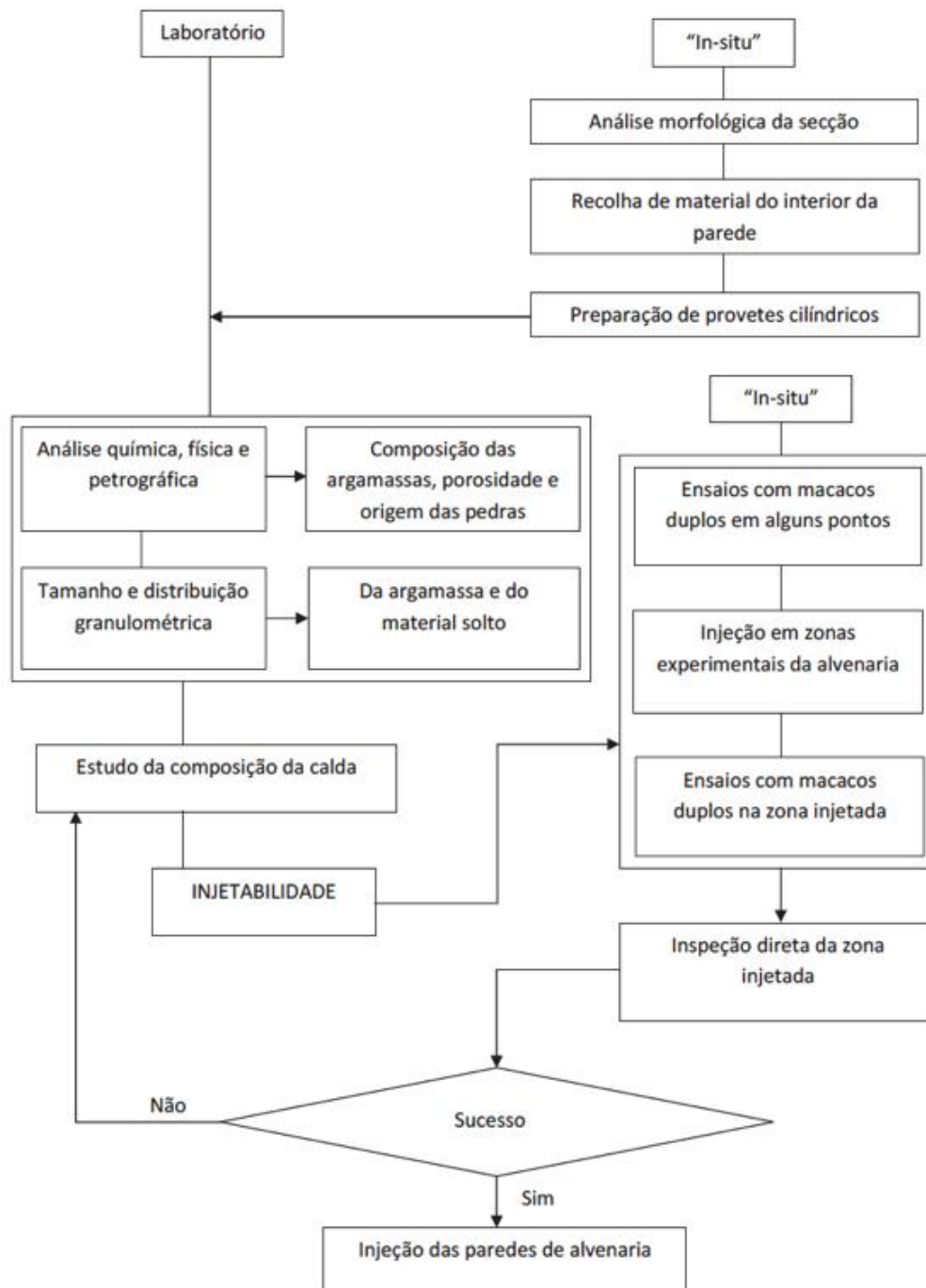


Figura 3.1 Procedimento esquemático para a aplicação da técnica de injeção de paredes de alvenaria (adaptado de Binda et al., 2006)

3.3. Processos de aplicação

Existem três tipos de processos de injeção dependendo das características da parede e da calda utilizada.

O primeiro é a injeção da calda por gravidade usualmente utilizado em parede muito degradadas com um grande número e volume de vazios (figura 3.3). Realiza-se através de tubos de injeção inseridos nas fissuras ou cavidades da parede. O procedimento é o seguinte:

- 1) Abertura dos furos para injeção, as perfurações devem ser feitas nas juntas de argamassa se possível a uma distância de cerca de 60 a 80 cm em função da espessura da alvenaria. A distribuição dos furos deve seguir os vértices de uma malha cobrindo assim a maior área possível (Van Rickstal, 2001; Valluzzi, 2000) como indicado na figura 3.2. Os furos devem ser executados a uma profundidade de $\frac{2}{3}$ a $\frac{3}{4}$ da espessura da parede (Silva, 2008).

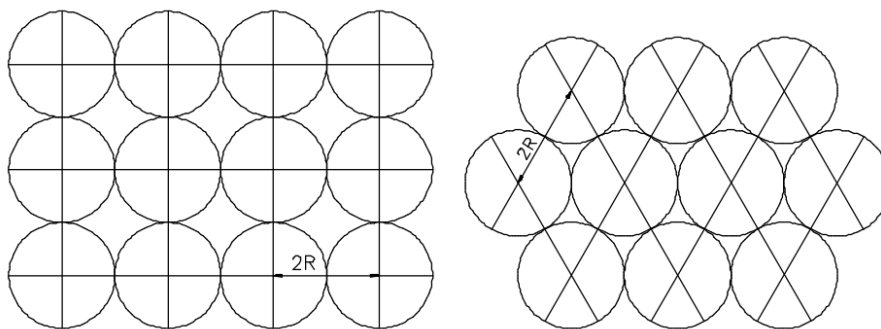


Figura 3.2 Padrões de malhas possíveis para a execução de furos (Van Rickstal, 2000)

- 2) Todas as fissuras e pequenas fraturas entre os elementos devem ser previamente selados com argamassas compatíveis com a parede.
- 3) Recomendava-se a lavagem da alvenaria até a sua saturação utilizando preferencialmente água pura e desionizada antes de efetuar a injeção. Isto, em princípio, melhora a ligação entre a calda e os outros materiais (Binda et al., 1993). Mais recentemente, Jorne (2016) constatou que a injeção prévia de água de forma a saturar a alvenaria melhora a injeção mas prejudica a aderência entre a calda e os outros elementos. Outros autores indicam o mesmo, Miltiadou-Fezans (1990) constata que a introdução de água enfraquece a alvenaria e dificulta a absorção de água da calda.
- 4) Devem ser utilizados tubos de purga para controlar o volume de calda injetada. Ou seja, quando os vazios estiverem preenchidos, o excesso de calda deve poder sair para impedir pressões elevadas permitindo também ao ar de ser expelido da zona onde se efetua o procedimento.

- 5) As injeções devem ser efetuadas de baixo para cima. Não devem ser efetuadas alturas superiores a um metro por dia para evitar pressões hidrostáticas excessivas a atuar na alvenaria (Vintzileou, 2006).
- 6) Depois de a calda endurecer, os tubos são removidos e os furos selados com argamassa compatível.

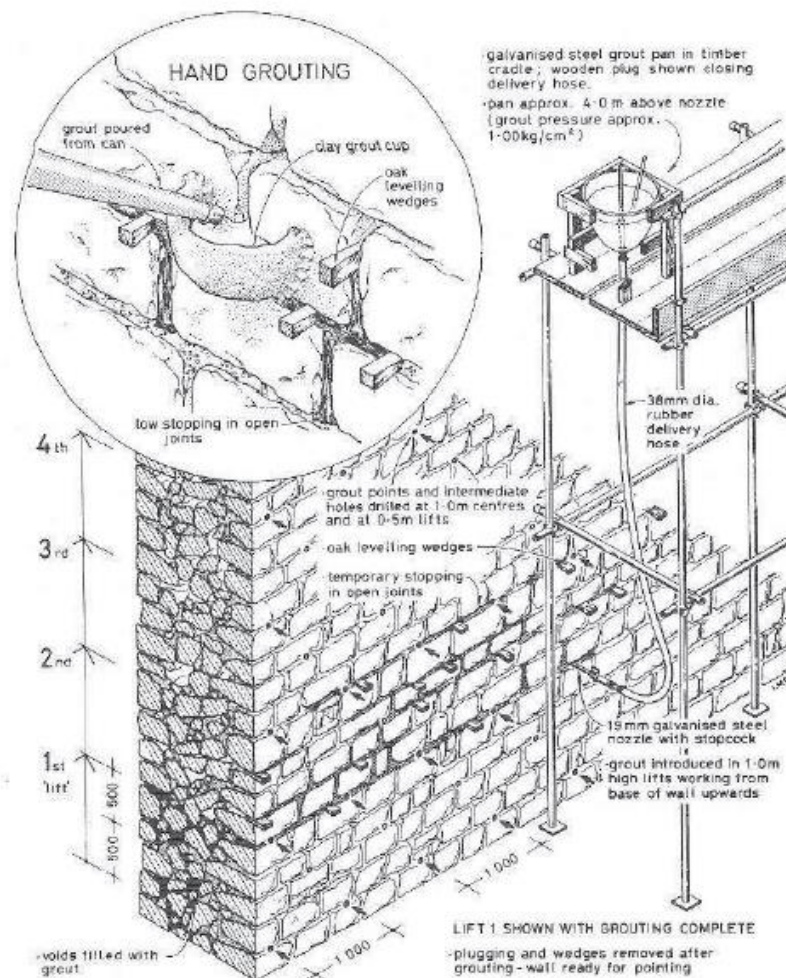
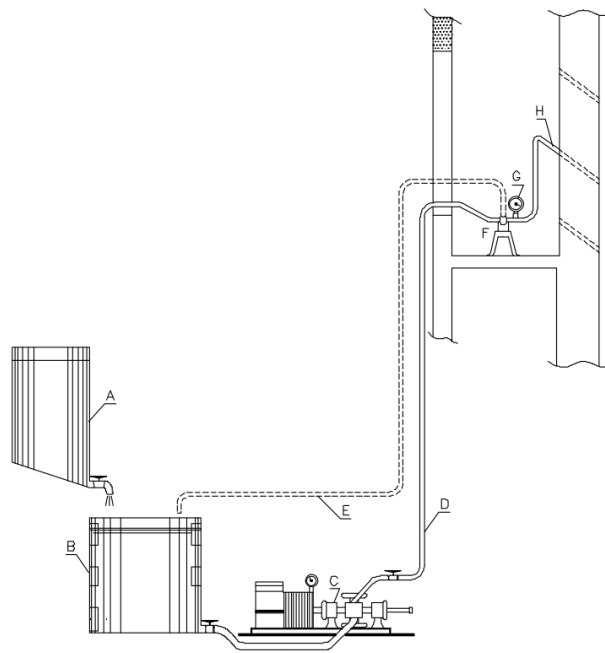


Figura 3.3 Representação esquemática da injeção de paredes com caldas por gravidade e manualmente (Ashurst, 1988)

O segundo processo de injeção é sob pressão. O processo de injeção da calda na parede segue os mesmos passos que a injeção por gravidade, porém há um controlo das pressões de injeção da calda (Jorne, 2016). A seguinte instalação (figura 3.4) apresenta um misturador onde os ingredientes da calda são misturados (A), um coletor onde a calda é colocada, continuamente misturada até à sua injeção (B) e uma estação de bombagem (C) que permite a injeção a uma pressão constante.



A) Instalação de mistura B) Coletor C) instalação de bombeamento D) e E) Condutas F),G) e H) Sistema de admissão

Figura 3.4 Representação esquemática duma instalação para injeção sob pressão (Van Rickstal, 2000)

O terceiro método de injeção de caldas é por sucção (figura 3.5). É uma técnica menos usual utilizada em situações onde a pressão pode ser disruptiva e ineficaz como é o caso de estátuas pequenas (Jorne, 2016) ou casos onde a consolidação por injeção é feita numa área precisa, ou seja, a calda não se deve espalhar para outras zonas. Para tal, um sistema “aspirador” é criado na estrutura a consolidar selando todos os pontos pelas quais a calda poderia vazear. De seguida, o sistema de aspiração é ligado removendo todos os gases e fluídos que se possam encontrar nos poros. Por fim, o diferencial de pressão entre a atmosfera e o vácuo permite a sucção da calda para dentro dos poros. É um método muito especializado eficaz com caldas sintéticas em estruturas mais pequenas pois a criação de um sistema de aspiração numa parede de alvenaria é muito difícil de aplicar.



Figura 3.5 Exemplo de um sistema de injeção por sucção (W16)

3.3. Exigências funcionais

A qualidade da operação de injeção da calda é garantida se alguns requisitos físicos, químicos, e mecânicos forem assegurados. (Guerreiro,2014).

Como requisitos físicos e reológicos destacam-se a tensão de cedência, viscosidade e a injetabilidade da calda durante toda a injeção. Assim deve-se garantir que a granulometria na calda é inferior à dimensão dos vazios da zona a injetar, que a calda seja homogênea com ângulo de contato elevado. É necessário garantir que a segregação e exsudação sejam mínimas utilizando a quantidade certa de água na mistura ou utilizando adjuvantes superplastificantes por exemplo (Binda et al., 1995). Outros requisitos físicos são que o tempo de presa seja adequado ao tempo necessário à injeção e também que a calda tenha retração baixa, assim como reduzida viscosidade.

Os requisitos químicos das caldas são a sua compatibilidade com o material onde se vai injetar a calda e a resistência aos sais para evitar fenómenos de eflorescências e criptoeflorescências que provocam a degradação da parede.

Por fim, os requisitos mecânicos são a compatibilidade mecânica da calda com o meio onde se vai injetar, ou seja, a rigidez e resistências mecânicas devem ser parecidas com as encontradas no local a injetar. Devem também ser aderentes aos materiais que se encontrem no suporte (argamassas antigas, pedras e areias).

As exigências funcionais físicas, químicas e mecânicas de uma calda de injeção encontram se sintetizadas na tabela 3.1.:

Tabela 3.1 Exigências funcionais de uma calda de injeção (Jorne, 2016)

	CARACTERÍSTICAS FUNCIONAIS	DESCRIÇÃO
EXIGÊNCIAS FÍSICAS	Calor de hidratação baixo	<ul style="list-style-type: none">• Temperaturas altas podem afetar adversamente a ligação com o substrato
	Contração limitada	<ul style="list-style-type: none">• Um dos problemas mais comuns na reparação é a contração das caldas no estado endurecido resultando numa fraca ligação (perda de adesão) entre a calda e os materiais in situ (devido a microfissuração nas interfaces). A contração é mais pronunciada em locais secos (Luso & Lourenço, 2016).• Uma retração relativamente baixa é necessária para uma boa ligação Toumbakari (1999)
	Tempo de presa adequado	<ul style="list-style-type: none">• O tempo de presa tem que ser adequado de forma a não dificultar o trabalho de injeção in situ
	Propriedades higroscópicas	<ul style="list-style-type: none">• Variações de volume limitadas devido a mudanças de humidade, água insolúvel na calda, etc.
	Compatibilidade microestrutural	<ul style="list-style-type: none">• A expansão do ligante produz caldas instáveis• Em relação à compatibilidade entre a calda e o material original

Tabela 3.2 (Continuação) Exigências funcionais de uma calda de injeção (Jorne, 2016)

	CARACTERÍSTICAS FUNCIONAIS	DESCRIÇÃO
EXIGÊNCIAS QUÍMICAS	Estabilidade química	<ul style="list-style-type: none"> Estabilidade às reações química entre a calda e os materiais no local ao longo do tempo
	Resistência à expansão/ resistência aos sulfatos	<ul style="list-style-type: none"> Resistência aos sulfatos prevenindo eflorescências e produtos expansivos que aumentam a pressão interior fissurando a calda e eventualmente danificar a alvenaria (Binda et al., 1997).
EXIGÊNCIAS MECÂNICAS	Resistência à compressão	<ul style="list-style-type: none"> Resistências similares com os materiais originais
	Módulo de Young	<ul style="list-style-type: none"> Similar ao módulo de Young dos materiais originais
	Resistência à flexão	<ul style="list-style-type: none"> Resistências similares com os materiais originais Flexibilidade razoável Aderência com os componentes de alvenaria no lugar
	Boa força de aderência/ boa resistência ao cisalhamento	<ul style="list-style-type: none"> Um suporte com porosidade alta tem os melhores resultados (Miltiadou-Fezans, 1990). Assim, a aderência entre a calda e o tijolo é mais alta que entre a argamassa de cal e a calda

3.4. Ensaios não intrusivos na avaliação da injeção de caldas

Após e antes a injeção de caldas em panos de alvenaria, é importante saber o estado interior destes. Avaliando o nível de compacidade podemos avaliar o estado de degradação das paredes antes da injeção e a eficácia do método após o processo.

3.4.1. Propagação de ondas sônicas

O ensaio de propagação de ondas ultra-sônicas traduz se no estudo da velocidade de propagação de ondas elásticas. A velocidade de propagação destas ondas depende das propriedades elásticas do meio onde estas passam, ou seja, quanto maior for a massa volúmica de um material, maior a velocidade de propagação das ondas. Assim, a variação da velocidade permite detetar alterações nos materiais estudados indicando a compacidade. O ensaio pode ser realizado segundo a norma ATSM C597-02 utilizando o método por transmissão direta. Basicamente, coloca se um transdutor emissor e um transdutor recetor nas faces opostas do material em estudo. Mede-se o tempo (t) em segundos que um impulso emitido demora a percorrer a distância L em metros até ao recetor. Obtém se assim a velocidade de ultra-sons com a seguinte equação:

$$V = \frac{L}{t}$$

Este método é limitativo pois os resultados obtidos não indicam onde se encontram os vazios ao certo dentro do material em estudo. Efetivamente, obtêm-se valores médios da velocidade da parede. Para o estudo do tipo de calda a utilizar pode ser útil porque pode indicar precisamente a compacidade do material onde se vai injetar a calda. Para obter resultados que permitam visualizar uma imagem do interior de uma parede por exemplo, existe a tomografia ultra-sónica (Coelho, 2013).

3.4.2. Tomografia sónica

A tomografia é resultado do processamento do registo das diferentes velocidades ultra-sónicas num corpo segundo um modelo tridimensional. Obtêm-se assim imagens que indicam as zonas de maior compacidade associadas a maiores velocidades, e as zonas de menor compacidade. A tomografia permite assim obter uma imagem tridimensional do interior de um material, provete ou parede indicando onde se encontram as zonas mais compactas e as zonas mais degradadas. Para obter esta imagem, é necessária a utilização de um software que processe uma grande quantidade de dados de velocidades de ondas ultra-sónicas.

O ensaio procede-se criando uma malha, segundo Jorne (2016), permitindo obter os dados de velocidades em diferentes zonas e ângulos.

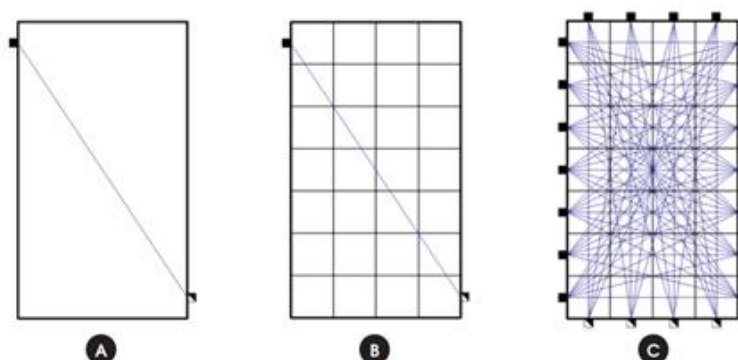


Figura 3.1. Modo de leituras ultrasónicas (W35)

Assim, realizam-se leituras em vários pontos de forma a cobrir a maior área possível do provete como exemplificado na figura 3.6. É possível obter assim imagens como a seguinte representando onde se encontram o maior teor de vazios ou de compacidade num provete.

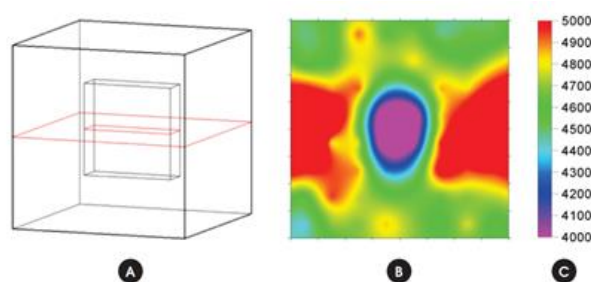


Figura 3.2. Imagem tomográfica (W35)

3.4.3. Georadar

O georadar é uma técnica de inspeção não destrutiva que se baseia na utilização de ondas eletromagnéticas. Funciona com a emissão de ondas entre os 10MHz e os 2000MHz dependendo do elemento em estudo e da dimensão do elemento, por uma antena emissora.



Figura 3.3 Aplicação da técnica do georadar numa parede (W19)

De seguida, uma antena recetora regista as reflexões das ondas eletromagnéticas. Esta informação é registada e processada obtendo um radargrama ou uma imagem tomográfica dependendo de onde se colocam as antenas emissoras e recetoras. Quando é possível colocar as antenas de um lado e de outro de uma parede é possível obter uma imagem tomográfica, quando não é possível colocar dos dois lados de um paramento, mas só de um lado se obtém o radargrama (Fernandes et al., 2007).

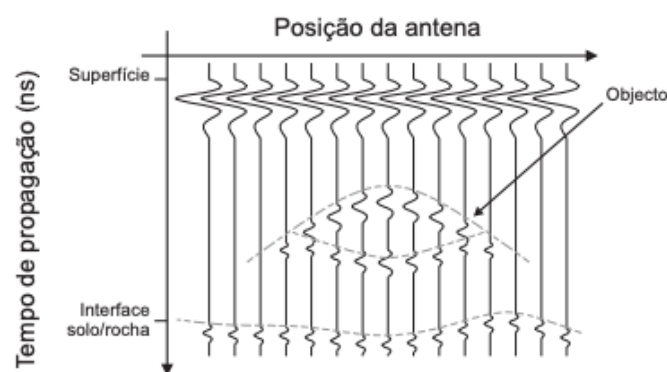


Figura 3.4 Representação dum radargrama (W47)

Assim, é uma técnica eficiente, mas depende de várias variáveis (frequência do sinal, distâncias, calibração dos equipamentos) que podem complicar o processamento e a interpretação dos resultados.

Tabela 3.3 Resumo de métodos não destrutivos para a avaliação do estado de degradação de estruturas de alvenaria

TIPO DE ENSAIO	DESVANTAGENS
TERMOGRAFIA	<ul style="list-style-type: none"> • pouco eficiente em avaliações em profundidade, especialmente se a espessura da parede for considerável • sensível a emissões externas
ENSAIOS SÓNICOS	<ul style="list-style-type: none"> • custo elevado • dificuldade na interpretação dos resultados • necessidade de calibração dos dados obtidos
ENSAIOS DE GEORADAR	<ul style="list-style-type: none"> ▪ a velocidade dos impulsos é afetada pela presença de humidade ▪ dificuldade na interpretação dos resultados ▪ necessidade de calibração dos dados obtidos ▪ perturbações dos dados dos sinais

4. Constituição de caldas

As caldas podem ser vistas como suspensões constituídas por um soluto (ligante), solvente, adjuvantes e/ou adições. Na sua maioria, nas caldas de injeção não são incorporados agregados para terem capacidade de penetrar nos vazios, no caso de se utilizar agregados devem ter uma granulometria menor que os diâmetros dos espaços vazios da parede. Assim sendo, as caldas são principalmente compostas de um ligante daí a se classificarem em dois grandes grupos em função do ligante utilizado: inorgânica (cals hidráulicas, aéreas, pozolanas e cimentos) ou orgânicas (resinas poliméricas).

4.1. Ligante

4.1.1. Caldas inorgânicas

Existem vários tipos de caldas consoante o tipo de ligante, nomeadamente caldas à base de cal, de cimento e o microcimentos que se diferenciam pelas partículas ultrafinas (98% das partículas têm um diâmetro inferior a $16\mu\text{m}$). As utilizações de caldas de cimento não têm vantagens na consolidação de alvenarias. Têm resistências mecânicas muito elevadas, tensão de rotura à compressão elevada, elevada aderência e rigidez. Assim, caldas de cimento em alvenarias antigas não devem ser utilizadas.

As caldas de cal aérea, ao contrário do cimento, são compatíveis quimicamente, fisicamente e mecanicamente com alvenaria e estruturas antigas. Permitem o fabrico de materiais muito porosos e tão rígidos quanto as argamassas que se encontram em edifícios antigos. Porém, as caldas de cal aérea funcionam com a carbonatação do Ca(OH)_2 para endurecer. Esta carbonatação só é possível com o contacto com o dióxido de carbono (CO_2) que dentro de alvenarias é muito escasso provocando um processo de cura muito lento ou mesmo inexistente e consequentemente resistências mecânicas iniciais muito baixas. Assim, para refechamento de juntas por exemplo, as caldas e argamassas de cal aérea são muito úteis, porém, para consolidação estrutural podem não ser muito eficazes.

A cal hidráulica difere da cal aérea pela percentagem dos constituintes que entram no forno e na temperatura do forno. Assim, as caldas de cal hidráulica endurecem tanto em presença de água como com o ar a uma velocidade mais rápida que a cal aérea. Acaba por ter vantagens parecidas com a cal aérea, compatibilidades físicas e químicas com edifícios antigos, porém com resistências mecânicas maiores do que uma cal aérea, mas não tão elevadas quando as dum cimento.

Resumidamente, as caldas à base cal hidráulica são as mais aptas para a injeção em alvenarias de pedra. Enquanto que as caldas de cal aérea são duráveis e compatíveis com alvenarias antigas, mas não têm as propriedades mecânicas exigidas numa consolidação estrutural que têm as caldas à base de cal hidráulica.

4.1.2. Caldas orgânicas

As caldas orgânicas podem ser resinas epoxídicas, poliéster, etc. São materiais extremamente fluidos pela falta de agregadas na sua composição. Estas caldas têm muito boas propriedades mecânicas e muito boa aderência a superfícies secas. Porém, em alvenarias antigas, existem espaços húmidos o que dificulta a aderência, grandes vazios que necessitariam de uma grande quantidade de resina para serem preenchidos o que se torna num processo muito mais dispendioso. Por sua vez, as propriedades mecânicas deste tipo de caldas não são compatíveis com alvenarias antigas (rigidez elevada e alta resistência mecânica). Assim, este tipo de caldas orgânicas não é aconselhável para a consolidação de paredes por injeção mas pode ser utilizado para fechar fendas e fissuras especialmente em rochas e betão e não em alvenarias antigas. A durabilidade deste tipo de caldas é também um fator a ter em conta pois sendo materiais muito recentes, o período de vida é muito reduzido ou desconhecido face à idade dos edifícios antigos.

4.1.3. Caldas com geopolímeros

Os geopolímeros são obtidos pela polimerização ou geopolimerização de matérias primas ricas em aluminosilicatos e de um ativador alcalino (Glukhovsky, 1980). Das propriedades de caldas à base de geopolímeros destaca-se: a elevada resistência mecânica, boa resistência ao desgaste por abrasão, elevada resistência ao fogo e ataque de ácidos, sulfatos e soluções salinas. Apresentam boa aderência a diferentes tipos de substratos e uma baixa retração e condutividade térmica (Colagelo et al., 2018). As matérias primas que deverão ser ricas em aluminosilicatos podem ser obtidas de diferentes fontes. Argilas caulínicas, metacaulino, cinzas volantes, escórias de alto-forno e sílica de fumo são exemplos de fontes de aluminosilicatos e hidróxidos, sais de ácidos fracos e fortes são ativadores alcalinos. Assim, as possibilidades de misturas são inúmeras e permitem obter resultados diversos. Porém, é comum o aparecimento de eflorescências resultado do excesso do ativador na mistura (Temuujin et al., 2009).

Caldas à base de geopolímeros têm características semelhantes às do cimento Portland. Porém são uma alternativa sustentável por não libertarem dióxido de carbono aos níveis da produção de cimento e por utilizarem subprodutos provenientes de indústrias. É uma área de estudo bastante recente sendo necessários mais estudos de forma a obter

formulações estáveis para utilização em alvenarias antigas (Temporão, 2019). A tabela 4.1 apresenta as vantagens e desvantagens dos diferentes tipos de caldas de injeção.

Tabela 4.1 Vantagens e desvantagens entre tipos de calda de injeção em paredes de alvenaria (Temporão, 2019)

TIPO DE CALDA	VANTAGENS	DESVANTAGENS
CALDAS SINTÉTICAS	<ul style="list-style-type: none"> • Boa penetração devida à baixa viscosidade • Boas propriedades mecânicas • Boa aderência a superfícies secas 	<ul style="list-style-type: none"> • Má aderência em superfícies molhadas • Possibilidade de problemas de comportamento térmico • Incompatibilidade com os materiais existentes nas paredes de alvenaria • Técnica dispendiosa quando se trata de preencher vazios de tamanho considerável
CALDAS DE CAL	<ul style="list-style-type: none"> • Apresentam características, compatíveis com os elementos históricos • Preparação simples 	<ul style="list-style-type: none"> • Em paredes de grande dimensões (especialmente a espessura) a entrada de CO₂, necessária à carbonatação do Ca(OH)₂ no caso de cals aéreas (cal hidratada) é dificultada e lenta, o que resulta, na prática, em resistências iniciais baixas
CALDAS DE CIMENTO	<ul style="list-style-type: none"> • Boas propriedades mecânicas 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Não são compatíveis com os elementos históricos, devidos à reduzida tolerância de movimentos e elevada dureza, aderência e rigidez. ▪ Proporcionam a criação de eflorescências devido ao aparecimento de sais ▪ Retração elevada e reduzida permeabilidade ao vapor de água ▪ São mais susceptíveis ao ataque de sulfatos
CALDAS DE GEOPOLÍMEROS	<ul style="list-style-type: none"> • Boas propriedades mecânicas • Boa estabilidade • Caldas sustentáveis 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Fraco desempenho reológico, fluidez e trabalhabilidade piores ▪ Aparecimento de eflorescências

4.2. Adições

As adições são materiais inorgânicos de finura igual ou menor que o ligante (cal ou cimento) que pode ser adicionado à calda com a finalidade de melhorar certas características. As adições para além de funcionarem como adição ou substituto parcial do ligante nas caldas de injeção, podem melhorar certas propriedades físicas, mecânicas ou químicas das caldas indicadas neste capítulo. Em seguida analisam-se as diferentes adições possíveis e em que medida são vantajosas.

4.2.1. Pozolanas naturais

4.2.1.1. Pozolanas

Pozolanas são, na sua origem, materiais siliciosos ou silico-aluminosos de origem vulcânica. O elevado teor de sílica que se encontra nas pozolanas pode reagir com o hidróxido de cálcio formando componentes com propriedades cimentícias na presença de humidade e à temperatura ambiente.

A mistura de pozolanas em caldas à base de cal permite obter caldas com as características mecânicas e com durabilidade melhoradas (Toumbakari, 2002). As vantagens da utilização de pozolanas são a diminuição da exsudação e redução da porometria (Shannag, 2002) e também uma maior resistência aos sulfatos. Segundo Jeffs (2001), a adição de pozolanas a caldas de cal, cimento ou cal e cimento aumenta a fluidez da calda, segregação e exsudação.

4.2.1.2. Metacaulino

O metacaulino é maioritariamente constituído de sílica e alumina (figura 4.1). O interesse deste material é que reage com o composto principal da cal, o hidróxido de cálcio. É mecânica e quimicamente compatível com construções antigas e apresenta um custo muito mais reduzido comparando com materiais comerciais (Coelho, 2013). Ao contrário da cinza volante, de sílica de fumo ou de outros aditivos, o metacaulino não provém do processamento industrial de um produto. É fabricado sob condições controladas para obter um produto de qualidade. É uma forma desidroxilada do mineral caulino encontrado na argila (Velosa et al. 2013).



Figura 4.1 Metacaulino (Pinto, 2004)

O metacaulino tem uma grande capacidade de fixar a água induzindo elevada retração que pode melhorar as resistências mecânicas (Pinto, 2004)

4.2.2. Pozolanas não naturais

4.2.2.1. Sílica de fumo

A sílica de fumo provém do fabrico de silício e ligas de ferro em fornos elétricos que atingem temperaturas de 2000°C (figura 4.2). O gás produzido SiO oxida com o ar e condensa formando partículas de dióxido de silício.

A adição deste material a caldas aumenta a coesão e compacidade dos materiais no estado endurecido pela finura característica deste material (Aitcin, 1998). As caldas com a adição de sílica de fumo são as que se comportam melhor de um ponto de vista reológico, com a melhor viscosidade e distribuição granulométrica (Biçer-s, et al., 2009). Do ponto de vista mecânico, há um aumento substancial da resistência (até 100%) para a resistência à compressão e da durabilidade das caldas de cal com sílica de fumo (Velosa, 2006). A elevada finura e reatividade da sílica combinada com a cal hidráulica natural resulta numa estrutura interna da calda de cal endurecida significativamente mais compacta que se traduz em maiores resistências mecânicas (Gouveia, 2017).



Figura 4.2 Sílica de fumo (W23)

A nano-sílica é um produto que provém do mesmo método que a micro sílica e a sua adição em caldas promove alguns fatores positivos e negativos no estado fresco e endurecido da calda. A dimensão dos seus elementos é extremamente fina (entre 330 a 340 nm) aumentando a sua reatividade (Abreu et al., 2017). No estado fresco, tanto a tensão de cedência como a viscosidade plástica aumentam proporcionalmente com a dosagem de nano-sílica diminuindo a fluidez da calda mas aumentando a consistência da calda (Gouveia, 2017). Porém, a partir de uma dosagem de 1,5% de nano-sílica a viscosidade da calda é tão alta com valores a rondar os 25 Pa.s, não é adequada para a injeção em paredes. No estado endurecido, a presença da nano-sílica permite reduzir o risco de ataque dos cloretos pela diminuição da porosidade aberta. Em relação às resistências mecânicas, a nano-sílica melhora o comportamento causada pela cristalização adicional que resulta da reatividade da nano-sílica com a cal livre (Fernández et al., 2013).

4.2.2.2. Escória de alto-forno

A escória de alto forno é um material siderúrgico não metálico proveniente da produção de aço. É um material principalmente composto de silicatos e sílico-aluminatos (Santos, 2013). Este material é muito utilizado como substituto do cimento por razões económicas e ambientais por se tratar de um resíduo e por diminuir a formação de gases, especialmente o CO₂, que é muito elevado na produção do cimento. No entanto, aumentam ligeiramente a viscosidade dos materiais cimentícios se usado em grande quantidade (70% do ligante), aumentam a sua resistência aos ataques por sulfatos. Osborne (1999) indica que a utilização de escórias de alto forno com cimento reduz o calor de hidratação, aumenta a sua impermeabilidade e aumenta a resistência à compressão em idades avançadas.

A escória de alto forno permite assim aumentar as resistências mecânicas e a durabilidade das caldas de injeção preenchendo os espaços vazios, ou seja, reduzindo a porosidade e promovendo uma reatividade maior (Kong et al., 2015).

4.2.2.3. Cinzas volantes

As cinzas volantes são um material proveniente da queima de combustível nas centrais termoelétricas a carvão (figura 4.3). Estas podem ser de natureza siliciosa ou calcária. Porém, a sua composição química depende muito do carvão utilizado e a eficácia da sua combustão. A utilização deste material em caldas de cal é positiva aumentando a suas resistências mecânicas à tração e compressão (Mana, 2013). As dimensões e geometria esférica das partículas de cinzas volantes aumentam a fluidez e diminuem a tensão de cedência e a viscosidade (Perret, 2002).

A adição de cinzas volantes influencia diretamente a tensão de cedência da mistura diminuindo os seus valores com o aumento de percentagem de cinzas introduzidas, ou seja, melhorando o seu comportamento (Brás et al., 2010). A estabilidade de uma calda é um fator muito importante nas caldas. A estabilidade é caracterizada pelo controlo de segregação e exsudação que são melhoradas com a introdução de cinzas volantes (Luso, 2012).

4.2.2.4. Cinza de casca de arroz

A queima controlada da casca de arroz dá origem a material designado por cinza de casa de arroz (figura 4.3). A cinza obtida é uma pozolana muito reativa constituída por sílica. As suas partículas apresentam uma estrutura celular com uma elevada superfície específica (Sousa, 2005). A utilização desta cinza produz efeitos similares aos da sílica de fumo melhorando a viscosidade e distribuição granulométrica e melhorando a durabilidade e resistências mecânicas.



Figura 4.3 Cinzas de casca de arroz (W27)

A cinza de casca de arroz, quando adequadamente obtida (influência da origem da casca, do tipo de forno utilizado e da temperatura), comporta-se como um material sílcioso. Assim, a cinza de casca de arroz pode-se classificar como um material pozolânico de elevada reatividade que melhora o comportamento mecânico das caldas (Almeida, 2008).

4.2.3. Fibras polipropileno

As fibras de polipropileno provêm do polipropileno que é um termoplástico, ou seja, moldável após aquecimento. É um plástico reciclável com baixo custo e boa resistência mecânica especialmente à flexão. Foram feitos estudos em relação ao comportamento de betões com estas fibras no caso de incêndios com resultados positivos. Por exemplo a reação explosiva do betão em presença de temperaturas elevadas (600°C) é evitado (Rodrigues et al., 2008). As fibras permitem também de melhorar a resistência ao choque e de reduzir a fissuração na fase de secagem.

4.2.4. Pó de tijolo

O pó de tijolo (figura 4.4) é um material utilizado desde a época do Império Romano. A elevada superfície específica das partículas finas e presença de sílica e alumina potenciam reações químicas pozolânicas melhorando as propriedades mecânicas e a sua durabilidade.



Figura 4.4 Pó de tijolo (W22)

4.2.5. Pó de pedra

Nesta categoria entram pós de pedra calcária ou argilosa. A granulometria fina destes materiais vai ter uma influência positiva na reologia das caldas aumentando a sua compacidade (efeito de filler).

Na tabela 4.2 resume-se as características das adições utilizadas em caldas:

Tabela 4.2 Efeitos de adições utilizados em misturas para injeção

	ADIÇÃO	CARACTERÍSTICAS
NATURAL	Pozolana	<ul style="list-style-type: none">• Diminuição da exsudação• Melhoramento da estanqueidade• Menor calor de hidratação• Maior resistência aos Sulfatos
	Metacaulino	<ul style="list-style-type: none">• Diminuição trabalhabilidade• Maior durabilidade• Compatibilidade com edifícios antigos
		<ul style="list-style-type: none">•
NÃO NATURAL	Sílica de Fumo	<ul style="list-style-type: none">• Aumento coesão e compacidade• Aumento da resistência e durabilidade
	Escória de alto-forno	<ul style="list-style-type: none">• Maior viscosidade• Resistência aos sulfatos• Maior durabilidade
	Cinzas volantes	<ul style="list-style-type: none">• Aumento de fluidez• Calor de hidratação reduzido• Melhor trabalhabilidade e durabilidade• Melhoria das resistências mecânicas
	Cinzas de casca de arroz	<ul style="list-style-type: none">• Maior fluidez• Melhoria das resistências mecânicas
OUTRAS ADIÇÕES	Fibras polipropileno	<ul style="list-style-type: none">• Melhoria das resistências mecânicas• Boa reação a incêndios
	Pó de Pedra	<ul style="list-style-type: none">• Maior compacidade• Melhor fluidez
	Pó de tijolo	<ul style="list-style-type: none">• Melhoria das propriedades mecânicas• Maior durabilidade

4.3. Água

A água é fundamental da preparação de caldas para injeção. A água influencia a viscosidade e a fluidez da pasta, para além de hidratar o ligante hidráulico utilizado na mistura. Recomenda-se o uso de água inodora e sem gosto (potável) para não afetar as propriedades da calda.

A quantidade de água utilizada na constituição de calda é muito importante. Quanto mais água, maior será fluidez e injetabilidade da calda. Porém, demasiada água pode provocar segregação e exsudação, aumentando a retração. Isto pode provocar fendilhação e redução da resistência mecânica expectada da calda (Baltazar, et al., 2013).

O rácio de água/ligante ótimo para a consolidação e reparação de alvenarias deve estar entre os 0,5 e 1,5 (Miltiadou, 1990) para ter uma ordem de ideias. O esquema da figura 4.5 apresenta os rácios para diferentes tipos de utilizações de caldas desde a caldas para cabos pré-esforçados a caldas para injeção em rochas e solos.

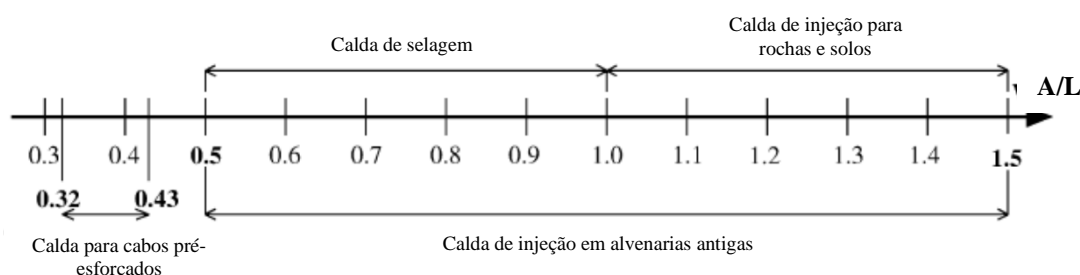


Figura 4.5 Esquema das diferentes utilizações de calda de cimento em função do rácio água/ligante (Rosquoët et al., 2003)

Com a utilização de superplastificantes e de outros adjuvantes que serão descritos de seguida, é possível reduzir o rácio água/ligante. Fichas técnicas de produtos pré-doseados indicam rácios de 0,4 como é o caso do produto Mape-Antique I da Mapei ou de 0,45 do produto Lime Injection da Tecnochem. Segundo Baltazar et al (2014a), um rácio de água/ligante abaixo de 0,5 pode não ser suficiente para a hidratação plena da cal hidráulica utilizada, mas, um rácio acima dos 0,5 pode resultar numa estrutura porosa fraca, ou seja, resistências mecânicas mais fracas.

Concluindo, o rácio de água/ligante apropriado deve ser o que é indicado na ficha técnica da calda pré-doseada. Noutros casos, um rácio de 0,5 parece ser o mais apropriado para as caldas à base de cal hidráulica, permitindo a fluidez necessária para a injeção eficaz de caldas.

4.4. Adjuvantes

Os adjuvantes adicionados a caldas promovem uma alteração do seu comportamento reológico dependendo do tipo e quantidade (Seabra, et al., 2007). Podem também alterar as propriedades físicas e mecânicas como o instante de início ou de fim de presa, entre outros.

4.4.1. Retentor de água

A adição de agentes retentores de água, retêm a água de constituição da calda aumentando a sua coesão reduzindo a segregação dos constituintes melhorando assim o seu desempenho (Paiva, 2015). Permitem controlar o espessamento (aumentando os valores de viscosidade plástica e da tensão de cedência), a trabalhabilidade da calda e a quantidade de água utilizada na amassadura da mesma.

Os adjuvantes utilizados para a retenção de água costumam ser éteres de metilcelulose. O espessamento resultado da introdução do adjuvante na calda permite a redução da segregação e melhora a homogeneidade da calda.

4.4.2. Superplastificantes

Os superplastificantes vão essencialmente aumentar a fluidez das caldas sem aumentar a quantidade de água adicionada. Estes contrariam a forte tendência de floculação das partículas na presença de água, aumentando a sua dispersão. Isto traduz-se numa melhor trabalhabilidade, consistência e fluidez da mistura de calda com uma quantidade constante de água (Baltazar, et al., 2012).

Os superplastificantes funcionam quimicamente em três fases: (i) adsorção superficial, (ii) carga electrostática sobre a partícula do ligante e (iii) dispersão. Ou seja, como as partículas têm o mesmo sinal e magnitude, uma vez adsorvidas superficialmente, as partículas repelem-se e aumentam a sua dispersão (figura 4.6).

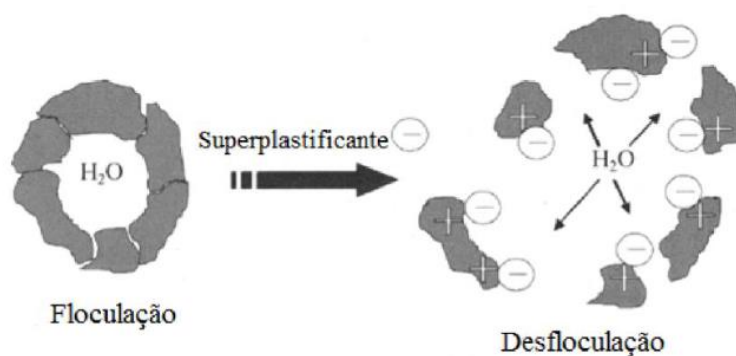


Figura 4.6 Efeito do superplastificantes na floculação das partículas de uma calda (Teixeira, 2014)

Os suplastificantes podem estar na forma líquida ou sólida. Existem, hoje em dia, superplastificantes à base de nanosílica para além de haver plastificantes à base de naftaleno e melamina. Os superplastificantes de última geração são feitos à base de éteres policarboxílicos cujo mecanismo de ação é a dispersão do ligante por estabilização estérica.

4.4.3. Introdutor de ar

Um agente introdutor de ar incorpora uma quantidade de bolhas de ar de homogeneamente distribuídas na calda reduzindo a massa volúmica e melhorando a

trabalhabilidade no estado fresco. Porém, a introdução deste agente em caldas de cal pode piorar o seu comportamento mecânico. O produto resulta da mistura de surfactantes aniônicos que têm uma elevada capacidade de reduzir a tensão superficial da água.

O ar é introduzido na calda sob a forma de bolhas de ar fechadas com diâmetros na ordem dos 0,01 a 1 mm substituindo assim parte da água de mistura. O ar que o adjuvante introduz vai melhorar a trabalhabilidade da calda por facilitar o deslizamento das partículas do ligante com menor atrito interno i.e. menor viscosidade (Baltazar et al.,2015).

Assim, os introdutores de ar têm várias funções que melhoram as características das caldas. No seu estado fresco, melhoram a trabalhabilidade e minimizam a exsudação tornando as caldas mais leves ao reduzirem a massa volúmica e o teor de água na mistura. No estado endurecido, o adjuvante permite uma melhor distribuição dos poros e aumentar a porosidade que, diminui as resistências mecânicas, mas também a absorção de água por capilaridade. Melhora também a resistência aos ciclos de gelo-degelo e a resistência à fissuração por reduzir o módulo de elasticidade.

4.4.4. Acelerador de presa

O acelerador de presa diminui o tempo da transição do estado plástico para o estado endurecido. Uma rapidez maior no processo de hidratação permite um aumento das resistências iniciais e finais da calda melhorando também a compacidade e durabilidade destas. Frequentemente são apresentados sob forma líquida permitindo uma aplicação mais simples sem a necessidade de acrescentar água à mistura.

4.4.5. Retardador de presa

Os retardadores de presa aumentam o tempo de transição da fase plástica ao estado endurecido da calda. Tendo em conta o processo de injeção descrito no capítulo 3.2, um retardador de presa permite aumentar o tempo de forma a realizar a injeção de forma eficiente. A injeção em vários pontos da parede traduz-se num maior tempo de aplicação porque é necessário injetar em muitos furos num curto espaço de tempo, ou seja, retirar e recolocar o tubo de injeção da calda muitas vezes. Assim, um retardador de presa permite que a calda não perca as suas características reológicas durante o processo de injeção.

4.4.6. Hidrófugo

Os adjuvantes hidrófugos reduzem a absorção capilar da calda endurecida por uma pequena introdução de ar na calda e pela redução da relação água/ligante. Os hidrófugos mais comuns da família do silício (silicone) como os silanos, siloxanos, resinas de silicone, silicanatos e silicatos. Os hidrófugos promovem a hidrorrepelência da calda no estado endurecido. No estado fresco, os adjuvantes hidrófugos aumentam o ângulo de contacto da calda reduzindo a perda de água para a superfície onde escoa.

Alguns estudos recentes realizados nomeadamente por Gomes (2016) utilizam óleo de linhaça como hidrófugo de origem vegetal.

Assim, no estado líquido da calda de injeção, a introdução de hidrófugos melhoram a homogeneidade desta, e, aumentando o ângulo de contato, permitem de perder menos água durante a injeção. Porém é no estado endurecido que têm mais influência. O adjuvante torna a calda pouco permeável e diminui a sua absorção capilar o que se traduz na redução de eflorescências e criptoeflorescências, ou seja, maior durabilidade.

4.4.7. Acelerador de endurecimento

Os aceleradores de endurecimento permitem desenvolver resistências mecânicas a curto prazo alterando assim o tempo de presa. Para além disso, permite reduzir a exsudação e a água de mistura. É um adjuvante especialmente utilizado quando as temperaturas são baixas (abaixo dos 10°C) e pretende se acelerar a presa da calda (W48).

4.4.8. Agente expansivo

O agente expansivo é um produto, normalmente em pó, de natureza inorgânica que anula o efeito de retração de uma calda. Mais precisamente, a transformação do óxido no hidróxido de cálcio provoca uma expansão em contato com a água, daí o nome do adjuvante, que compensa a retração. Porém, é um produto que tem que ser utilizado com muito cuidado quando utilizado em caldas por exemplo onde a variação do volume da calda injetada pode influenciar negativamente o sucesso da consolidação.

A tabela 4.3 resume os efeitos primários e secundários dos adjuvantes descritos anteriormente:

Tabela 4.3 Efeitos de adição de adjuvantes à mistura (Paillère et al., 1992; Valluzzi, 2000)

ADIÇÃO	EFEITO PRIMÁRIO	EFEITO SECUNDÁRIO
RETENTOR DE ÁGUA	<ul style="list-style-type: none"> Retém a água de mistura e diminui a exsudação 	<ul style="list-style-type: none"> Retardador de presa e melhoria estabilidade
SUPERPLASTIFICANTE	<ul style="list-style-type: none"> Aumento da fluidez com redução de água 	<ul style="list-style-type: none"> Aumento do tempo inicial de presa, redução da exsudação, aumento da resistência mecânica
INTRODUTOR DE AR	<ul style="list-style-type: none"> Prevenção do efeito gelo-degelo e aumento da durabilidade 	<ul style="list-style-type: none"> Melhoramento da estabilidade e diminuição da fluidez
ACELERADOR DE PRESA	<ul style="list-style-type: none"> Diminuição do tempo de presa 	<ul style="list-style-type: none"> Aumento da resistência a curto prazo
RETARDADOR DE PRESA	<ul style="list-style-type: none"> Aumento do tempo de presa 	<ul style="list-style-type: none"> Redução da resistência mecânica a breve prazo e aumento a longo prazo; maior retração
REDUTOR DE ÁGUA	<ul style="list-style-type: none"> Aumento da fluidez, redução de água e aumento da resistência mecânica da mistura 	<ul style="list-style-type: none"> Retardador de presa, redução da exsudação

ACELERADOR DE ENDURECIMENTO	<ul style="list-style-type: none"> • Desenvolvimento da resistência mecânica a breve prazo 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Redução da exsudação, redução de água de mistura, aumento da retração e da deformação viscosa, alteração do tempo de presa
AGENTE EXPANSIVO	<ul style="list-style-type: none"> • Redução da retração 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ desconhecido

5. Caracterização e propriedades de caldas no estado fresco

5.1. Considerações iniciais

As propriedades das caldas no estado fresco são essenciais para uma consolidação eficaz. A reologia é a ciência que estuda a deformação e escoamento de materiais sólidos ou líquidos quando estes são submetidos a um campo de tensões. Consequentemente, a caracterização reológica é fundamental para a injeção de caldas.

5.2. Massa volúmica fresca

A massa volúmica no estado fresco é determinada pelo quociente entre a massa e o volume da calda líquida. A determinação da massa volúmica pode ser efetuada de acordo com

a norma NP EN 445 (2008). Assim, para se determinar a massa volúmica utiliza-se um recipiente de volume conhecido procedendo-se à determinação da massa da calda no estado líquido preenchendo o volume conhecido do recipiente. No Sistema Internacional de Unidades a massa volúmica exprime-se em kg/m^3 sendo usual, em laboratório, exprimir em g/cm^3 pelas quantidades pequenas em que se trabalha.

5.3. Retenção de água

A retenção de água traduz-se pela capacidade da água de constituição permanecer numa calda por um período suficiente, mantendo as suas propriedades reológicas. A molhagem prévia, se possível, do local onde se vai injetar a calda reduz a migração da água da calda para os materiais de construção porosos que se encontram na parede. Porém, pode reduzir a aderência da calda aos materiais existentes (Jorne, 2016).

O ensaio de retenção de água permite calcular o tempo necessário para retirar uma determinada quantidade (3ml a 5ml) de água de uma amostra de uma calda em vácuo, o ensaio segue a norma ASTM C941-02 (Figura 5.1). O ensaio consiste em medir o tempo que se demora a recolher diferentes quantidades de água de uma calda com a ajuda de uma bomba a vácuo a pressão constante que reproduz o efeito da sucção exercida pelo interior de uma alvenaria seca (Cardoso et al. 2014).

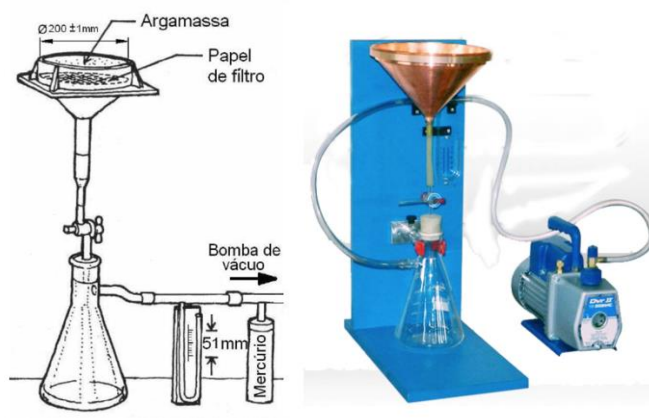


Figura 5.1 Ensaio de retenção de água utilizando um funil de Buchner modificado (W30, W31)

Os materiais que compõe a calda têm uma grande influência na capacidade de retenção de água. Os superplastificantes são os adjuvantes que mais o influenciam, possibilitando ao maior número de partículas do ligante de entrarem em contato com a água diminuindo a quantidade de água livre na mistura. A influência positiva dos superplastificantes na capacidade de reter a água é explicada pela maior dispersão das partículas da mistura aumentando a área de absorção de água e um menor volume de água disposto a sair (Jorne et al., 2016). A adição de nano-sílica, pelo contrário, despromove a diminuição da quantidade de água livre devido à sua elevada superfície específica, o que consequentemente promove a capacidade da calda em reter a água de constituição (Gouveia, 2017).

A retenção de água na mistura duma calda é uma característica importante tanto no estado fresco como no estado endurecido (Assad, 2015). Quanto menor a quantidade de água

livre, melhores as ligações entre as partículas dos ligantes e as partículas de água melhorando as características físicas e mecânicas da calda no seu estado endurecido.

5.4. Injetabilidade

A injectabilidade duma calda pode ser determinada através do ensaio de injectabilidade que é realizado feito utilizando moldes cilíndricos em acrílico com um diâmetro de 150mm e uma altura de 300mm (Luso, 2012). O material acrílico transparente permite observar o enchimento do molde. De seguida, preenche-se o molde com material granular com características semelhantes aos materiais que são propícios de encontrar na parede em estudo (areias, xisto, granito, calcário, etc.) e que reproduzam as propriedades do núcleo da alvenaria (absorção de água, vazios e os canais entre vazios da parede). Por fim, procede-se ao enchimento dos moldes com uma calda misturada nas mesmas condições que iram ocorrerem in situ. A injeção faz-se à mesma pressão para todos os provetes com a utilização de um equipamento de injeção chamado “pressure pot”, de baixo para cima (figura 5.2). Regista-se então o tempo necessário para encher cada cilindro. Os provetes obtidos poderão, posteriormente, servir para realizar a ensaios no seu estado endurecido a diferentes idades.

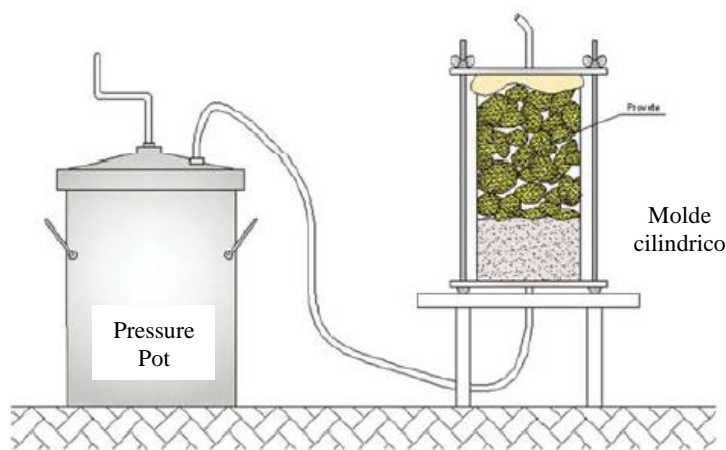


Figura 5.2 Esquema do ensaio de injectabilidade (Luso, 2012)

O ensaio de injectabilidade pode ser feito segundo a norma francesa NF P 18-891 ou a norma ASTM C943 para realizar este ensaio. Segue o mesmo procedimento que o ensaio descrito anteriormente com um cilindro em acrílico com dimensões normalizadas preenchido com uma mistura de areia de diferentes granulometrias simulando, da melhor forma possível, o meio poroso do interior de uma parede de alvenaria antiga.

A mistura de diferentes granulometrias permite reproduzir os vazios que se encontrariam no interior de uma parede. De seguida, injecta-se a calda em estudo de baixo para cima a uma pressão constante de 0,75 bar e mede-se o tempo que a calda demora a chegar ao topo do cilindro e o tempo que um pote de medição colocado ao lado do cilindro (como se pode ver na figura 5.3) demora a preencher de 100 ml. Estes dois parâmetros temporais são a base do ensaio e, segundo o ensaio, para uma calda ser considerada injetável,

deve chegar ao topo do cilindro em menos de 50 segundos. É interessante realizar o ensaio com temperaturas diferentes, tempos de repouso diferentes e diferentes formulações para comparar os resultados (Jorne, 2016).

Luso (2012) realizou vários ensaios de injetabilidade com diferentes meios porosos e caldas comerciais e caldas formuladas em laboratório. Os fatores que influenciam a injetabilidade são o estado de humidade do meio poroso: quanto mais molhadas, mais fácil e eficiente a injeção da calda, o tipo de calda utilizada e a pressão de injeção. Assim, o tempo médio que a injeção de calda demora a preencher os moldes com um volume de vazios maior que 50% varia da natureza do material do meio poroso (xisto, granito e calcário), sendo o maior tempo para o granito que é um material mais rugoso, varia consoante as características reológicas das caldas e varia consoante a pressão e o tempo de injeção. Porém, as injeções em todos os casos acaba por ser positiva e eficaz.

5.5. Estabilidade: avaliação da exsudação e da variação de volume

A exsudação é medida através do volume de água que permanece no topo da calda ao fim de 3 horas em repouso numa proveta graduada de 500 ml com a evaporação impedida (figura 5.3). A variação de volume de calda é medida pela diferença, em percentagem de volume de calda, após 24 horas no início do ensaio segundo a norma NP EN 445 (2008).



Figura 5.3 Ensaio para a avaliação da exsudação (NP EN 445, 2008)

O procedimento é o seguinte, coloca-se a proveta graduada na vertical num local plano e sem vibrações. De seguida, preenche-se com calda e é selada no topo com película aderente para impedir evaporações. Regista-se a altura inicial de calda h_0 e a hora a que inicia o ensaio t_0 . Por fim, regista-se a altura de calda h_g e de água exsudada h_w em intervalos de 15 min na primeira hora, na segunda hora, terceira hora e passadas 24 horas. Os resultados são expressos em percentagem da seguinte forma:

$$Exsudação = \frac{hw}{h0} \times 100$$

$$Variação\ de\ volume = \frac{hg - h0}{h0} \times 100$$

A exsudação não deve exceder os 0,3% após as 3 horas de repouso a variação de volume deve ficar compreendida no intervalo [-1% a +5%] após as 24 horas de repouso segundo a norma NP EN 447 (2008).

5.6. Propriedades reológicas em laboratório

5.6.1. Viscosímetro

O viscosímetro é um equipamento que permite medir a viscosidade de um fluido através do arrasto provocado pelo movimento relativo entre o fluido e a superfície do equipamento utilizado. Porém, os viscosímetros medem a viscosidade sob uma condição de fluxo.

Existem dois métodos principais utilizados em viscosímetros: capilar e rotacional. O método capilar é mais simples e menos dispendioso e consiste em escoar um material por um tubo estreito através de forças hidrostáticas ou de uma pressão pré-determinada. De seguida, com a lei de Poiseuille relaciona-se a taxa de fluxo com a viscosidade do líquido (Metrogos, 2016).

O segundo método rotacional consiste em sujeitar um fluido a corte entre duas superfícies induzindo uma das superfícies a uma rotação. Os resultados são medidos de duas formas, mantendo a velocidade de rotação, avaliando o momento resultante ou mantendo o torque obtendo a velocidade de rotação. Este tipo de viscosímetro rotacional denomina-se de viscosímetro de Brookfield (figura 5.4), é de utilização simples e muito robusto mas é limitado na sua precisão.

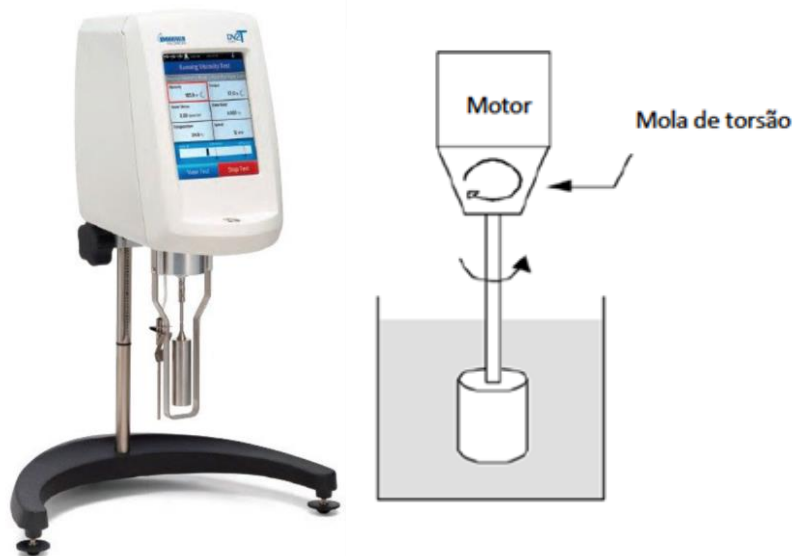


Figura 5.4 Viscosímetro rotacional de Brookfield e sua representação esquemática (W28)

5.6.2. Reómetros

Os reómetros são equipamentos que medem a tensão e a deformação aplicadas numa amostra. Com estes parâmetros é possível determinar as propriedades reológicas de um material. Os reómetros permitem a medição da viscosidade e a elasticidade (medições oscilatórias) de materiais, mas numa gama mais vasta de tensões e taxas de corte contrariamente aos viscosímetros. Por não terem um sistema mecânico de engrenagens como os viscosímetros, a precisão das medições reológicas aumenta substancialmente (figura 5.5).

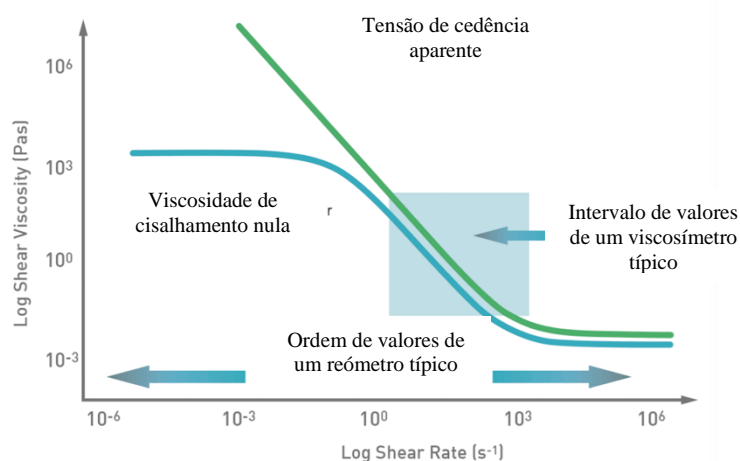


Figura 5.5 Gráfico representativo da viscosidade plástica e da tensão de cedência em função da capacidade do reómetro (W29)

Existem vários tipos de reómetros que se podem dividir em duas categorias: reómetros de cisalhamento e elongacionais. Os reómetros de cisalhamento podem ser subdivididos em reómetros capilares e rotacionais.

Os reômetros elongacionais são os menos utilizados pela dificuldade em estabelecer fluxos elongacionais homogêneos. Os reômetros capilares são utilizados para materiais altamente viscosos, que não é o caso de caldas de injeção.

Assim, o mais comum é utilizar reômetros rotacionais. Estes funcionam medindo a velocidade de uma superfície móvel em contacto com uma das fronteiras do material e a leitura do torque gerado pela força de cisalhamento exercida sobre o fluido.

A tensão de cedência é a tensão mínima que é necessário aplicar para que se inicie o escoamento e é um dos resultados que permite a comparação reológica entre diferentes misturas. A viscosidade plástica indica a velocidade de escoamento após o início do escoamento, quanto menor maior a velocidade de escoamento. Assim, para a boa aplicação de uma calda é desejável que a mistura tenha valores baixos de tensão de cedência e de viscosidade plástica (Ferraris, 1999; Tkach, 2015).

Gouveia (2017) conclui que uma mistura de cal com 1% de nano-sílica, 0,8% de superplastificante e um rácio de água de 0,5 é a composição mais apropriada para a injeção de caldas com uma tensão de cedência de 12,3 Pa e uma viscosidade plástica de 0,16 Pa.s segundo o modelo de Bingham modificado.

Gomes (2016) obteve para a mesma mistura sem nano-sílica valores de 1,2Pa e 0,1 Pa.s para tensão de cedência e viscosidade plástica, ou seja, valores melhores. Analisou também a mesma mistura com a adição de óleo de linhaça o que não influenciou negativamente as características reológicas.

Mais recentemente, foi feito um estudo reológico para caldas à base de cal com óleo de linhaça, silicone e um hidrófugo comercial (Plastocrete 05 da Sika) cada uma destas misturas com a adição de um superplastificante a diferentes dosagens (1,2%, 1,6% e 2%). Foram feitos ensaios para obter a tensão de cedência e a viscosidade plástica para cada mistura comparando a duas caldas de referência de cal com 1,2% e 1,6% de superplastificante. Os resultados das diferentes misturas foram uma decepção em termos de comportamento reológico, as misturas com óleo de linhaça e silicone têm valores muito superiores aos de referência. A calda com o hidrófugo comercial comportou-se de forma aproximada às caldas de referência sem melhorar o desempenho reológico. Assim, o autor concluiu que, com base nos ensaios reológicos, a adição de silicone ou óleo de linhaça não se afiguram como boas opções para caldas de injeção em alvenarias (Miguel, 2017).

Cardoso (2015) fez os mesmos ensaios com uma mistura de cal, diferentes dosagens de superplastificante (0,5%, 1% e 1,5%) e diferentes rácios de água (0,45, 0,5 e 0,55). Comparativamente a Gomes, obteve sempre valores de tensão de cedência e de viscosidade plástica ligeiramente superiores.

5.7. Propriedades reológicas in situ

5.7.1. Teste de fluidez - cone de Marsh

O teste de cone de Marsh fornece tempos de escoamento e o que permite comparar viscosidades entre provetes diferentes. Baltazar et al (2014b), propôs um modelo permitindo estimar a viscosidade com base nos tempos de escoamento do cone de Marsh (figura 5.6).

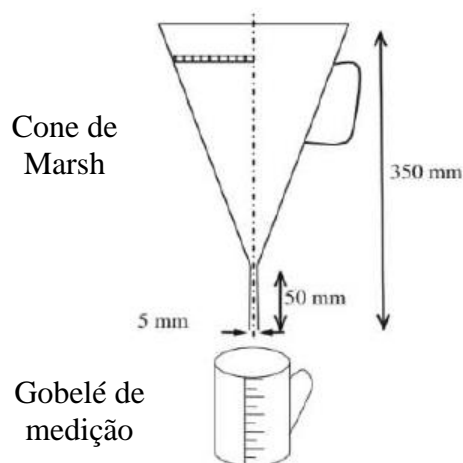


Figura 5.6 Esquema dum cone de Marsh com dimensões (Baltazar, 2014b)

Segundo a norma ASTM C939-02, insere-se 1000 ml de uma calda no cone. De seguida, mede-se o tempo que demora 800 ml de calda a fluir.

Os resultados do ensaio de cone de Marsh permitem uma análise comparativa entre diferentes produtos porque o estado da superfície interior do funil, as dimensões da saída, a inclinação do cone e vários outros fatores têm uma forte influência nos resultados obtidos. Ou seja, os resultados obtidos não podem ser utilizados genericamente, só devem ser utilizados comparativamente utilizando sempre os mesmos materiais de ensaio para as diferentes misturas. Quanto maior for o tempo de escoamento menor é a viscosidade da mistura (Roussel e Le Roy, 2005). A temperatura ambiente durante o ensaio tem também uma grande influência nos resultados: quanto mais alta menor o tempo de escoamento (Luso, 2012).

5.7.2. Teste de espalhamento

Este teste consiste na medição do espalhamento duma calda em quatro direções. O procedimento é o seguinte: em primeiro lugar enche-se um tubo metálico com calda sobre uma superfície plana, de seguida, levanta-se o molde de forma uniforme permitindo à calda espalhar-se na superfície plana, por fim, mede-se o espalhamento nas quatro direções imediatamente após o levantamento do molde e após 30 minutos (figura 5.7) segundo a norma NP EN 447 (2008).



Figura 5.7 Esquema e execução do método de espalhamento (NP EM 445,2008)

É possível realizar um teste semelhante chamado mini teste de espalhamento utilizando um mini cone como se pode observar na figura 5.8.



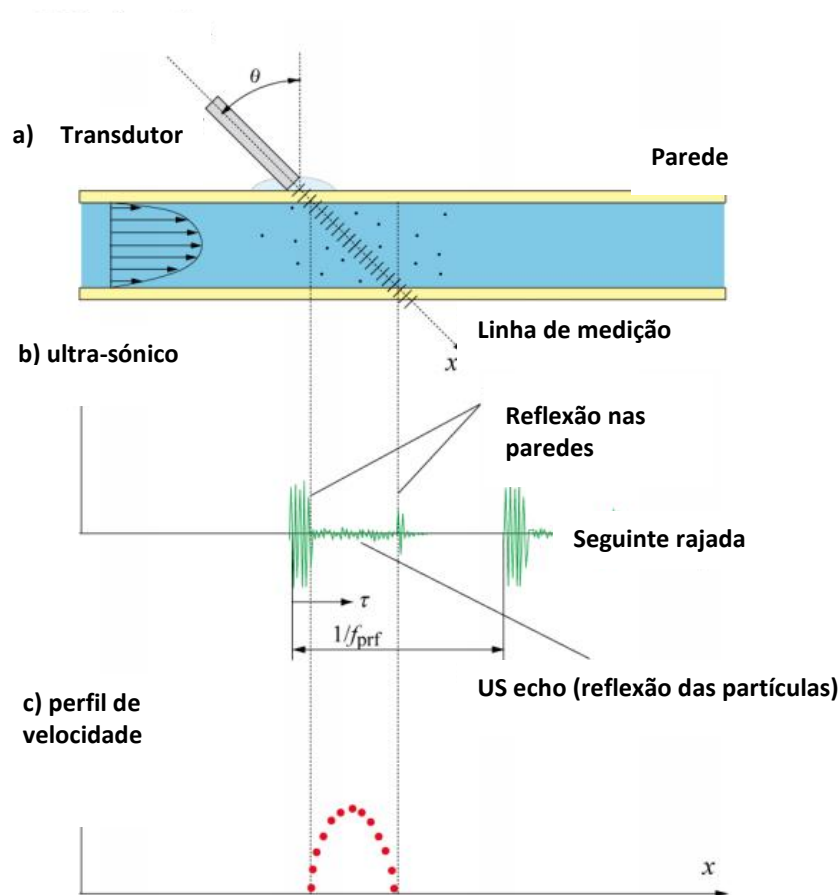
Figura 5.8 Esquema e execução de um mini teste de espalhamento [Baltazar, 2014b]

A NP EM 445 indica que o espalhamento medido no momento inicial e após os 30 minutos não deverá ser inferior a 140 mm e a fluidez não deve variar mais do que 20% entre os dois mesmos instantes.

Os resultados do ensaio permitem a comparação entre diferentes tipos de calda sendo que o espalhamento está relacionado com a tensão de cedência: quanto menor a tensão de cedência, maior o espalhamento (Baltazar et al, 2014b).

5.7.3. Método do perfil de velocidades por ultra-sons - doppler

Este método baseia-se na emissão de pulsos ultra-sónicos e medição das suas velocidades quando atravessam uma tubagem onde escoia a calda (figura 5.9). Assim, é possível obter um perfil de velocidades ultra-sónicas para diferentes caldas juntamente com medições de diferencial de pressão. É um método não invasivo que permite caracterizar instantaneamente as características de uma calda tal como a viscosidade e tensão de cedência (Rahman, 2015).



(a) Configuração standard para a medição do fluxo do tubo (b) Gráfico ultra-sônico (c) Perfil de velocidade obtido

Figura 5.9 Esquema do método de caracterização reológica de uma calda com velocidades ultrassônicas (adaptado de Takeda et al., 1995)

5.8. Considerações finais das propriedades da calda fresca

As caldas no seu estado fresco têm que obedecer a certas propriedades que podem ser analisadas com os ensaios descritos.

A fluidez de uma calda depende da distribuição granulométrica dos grãos, da natureza, forma e superfície das partículas, da percentagem de água de amassadura e do método de mistura da calda (Vintzileou, 2006). A fluidez traduz-se pela tensão de cedência, a tensão mínima para que se inicie o escoamento, e a viscosidade plástica, a velocidade de escoamento da calda após o início do escoamento.

A estabilidade da calda é a sua capacidade de permanecer homogênea i.e. sem que ocorreram fenómenos de segregação, a tendência para os materiais se estratificarem, ou exsudação, a migração da água para a superfície. A estabilidade depende dos ligantes e da sua

granulometria, do rácio de água/ligante, da introdução ou não de adições e adjuvantes. O ensaio de avaliação de exsudação permite a quantificação destes fenómenos de instabilidade.

A injetabilidade é a capacidade de uma calda escoar permitindo uma injeção fácil e eficiente em paredes de alvenaria. A tensão de cedência e viscosidade plástica de uma calda são características essenciais para conhecer a sua capacidade de injeção.

A tabela 5.1 relaciona os parâmetros e ensaios necessários para determinar as propriedades da calda.

Tabela 5.1 Ensaio para a determinação das propriedades da calda fresca (Perret et al., 2003; Luso, 2012)

PARÂMETRO	NORMA	DESCRIÇÃO
MASSA VOLUMICA	EN 1015-6 (1999)	<ul style="list-style-type: none"> Quociente entre a massa e o respetivo volume da calda, quando introduzida em recipiente próprio
VISCOSIDADE E TENSÃO DE CEDÊNCIA	ASTM D4016 (2008)	<ul style="list-style-type: none"> Medição de viscosidade e tensão de cedência através do viscosímetro de Brookfield e reómetro rotacional
FLUIDEZ	ASTM C939 (2010) NP EN 445 (2008) NP EN 447 (2008)	<ul style="list-style-type: none"> Fluir a calda através de um cone da ASTM ou de Marsh, e medir o tempo de escoamento
EXSUDAÇÃO ESTÁTICA	ASTM C940 (2010) NP EN 445 (2008)	<ul style="list-style-type: none"> Medição da quantidade de água que aparece sobre a superfície da calda num determinado volume de calda
EXSUDAÇÃO FORÇADA	ASTM C941 (2010)	<ul style="list-style-type: none"> Medição do tempo necessário para remover 30 ml da mistura quando submetida a uma ligeira pressão
INJETABILIDADE	ASTM C943 (2010) NF P 18-891	<ul style="list-style-type: none"> Medição da capacidade da calda passar através de uma coluna de areia com dimensões específicas

6. Caracterização e propriedades de caldas em estado endurecido

6.1. Considerações iniciais

O comportamento das caldas no estado endurecido é um fator fundamental na injeção de caldas em alvenarias antigas. A compatibilidade das suas características mecânicas e físicas com a alvenaria original é essencial. O presente capítulo indica e descreve os diferentes ensaios que devem ser feitos e os resultados esperados para as caldas no estado endurecido.

6.2. Propriedades mecânicas

6.2.1. Módulo de elasticidade

O módulo de elasticidade pode-se determinar pelo método dinâmico ou estático sendo que o ensaio dinâmico não é destrutivo enquanto que o estático o é. O módulo de elasticidade estático é determinado através do declive da reta secante à fase elástica no gráfico de tensão em função da deformação. Sendo o módulo de elasticidade dinâmico um ensaio não destrutivo, é mais exequível comparar os resultados do módulo de elasticidade dinâmico entre diferentes materiais.

A rigidez de um material sólido é quantificada pelo módulo de elasticidade dinâmico. Para obter o módulo de elasticidade dinâmico procede-se a um ensaio que emite vibrações de uma extremidade de um provete à outra. As medições obtidas são diretamente processadas num software obtendo o módulo.

$$E_d = \frac{4 \times L^2 \times F_L^2 \times \gamma}{g} \times 10^6$$

O módulo de elasticidade dinâmico E_d em MPa, L é o comprimento do provete em metros, F_L é a frequência de ressonância fundamental longitudinal em Hz, γ o peso volúmico do provete em N/m³ e por fim g é aceleração gravítica.

Quanto mais baixo o valor do módulo de elasticidade, maior será a sua deformabilidade sendo o objetivo, no caso de uma calda, de compatibilizar os módulos elásticos dinâmicos do suporte e da calda.

Veiga e Santos (2015) caracterizam o intervalo de valores do módulo de elasticidade dinâmico para argamassas de cal hidráulica natural para conservação de edifícios antigos entre 2000 e 5000 MPa (tabela 6.1). Assim, para haver compatibilidade entre caldas novas que se vão injetar em alvenarias antigas, os módulos de elasticidade dinâmico devem estar compreendidos entre estes valores.

Almeida (2012) deduz que o módulo de elasticidade dinâmico para uma calda à base de cimento Portland varia entre os 20 GPa e os 40 GPa dos 3 dias aos 28 dias, ou seja, entre 20000 MPa e 40000MPa o que não é compatível com alvenarias antigas.

Os resultados de Gomes (2016) para o mesmo ensaio com uma mistura de cal hidráulica natural e outra de cal hidráulica natural (60%) e cimento Portland (40%), os valores variam entre 1600 MPa e 4300 MPa o que é compatível com alvenarias antigas.

Tabela 6.1 Características mecânicas de uma argamassa em alvenaria antiga (Veiga et al., 2015)

Argamassa	Características mecânicas (MPa)		
	Rt	Rc	E
Reboco exterior	0,20 – 0,70	0,40 – 2,50	2000 - 5000
Reboco interior	0,20 – 0,70	0,40 – 2,50	2000 - 5000
Juntas	0,40 – 0,80	0,60 – 3,00	3000 - 6000

Rt – Resistência à tração por flexão; Rc – Resistência à compressão; E – Módulo de elasticidade dinâmico por frequência de ressonância; C – Coeficiente de capilaridade

6.2.2. Resistência à tração por flexão

O ensaio de resistência à tração por flexão é feito aplicando uma carga a meio vão de um provete paralelepípedo ou cilíndricos comprimindo a face superior e tracionando a inferior. Assim, obtém se o valor de carga última de cedência quando ocorre uma rotura na face tracionada. O ensaio é feito segundo a norma EN 1015-11:1999a.

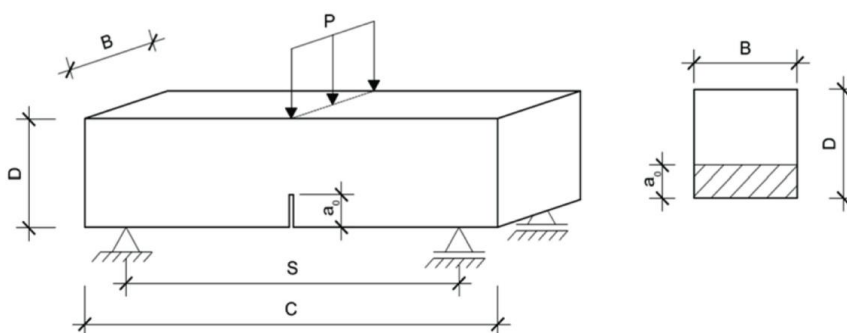


Figura 6.1 Esquema do ensaio de resistência à tração por flexão (W32)

O valor de resistência à tração por flexão pode ser determinado com a fórmula:

$$R_t = \frac{3 \times F_t \times l}{2 \times b \times d^2}$$

Onde R_t é a resistência à tração em MPa, F_t a carga última à tração em N, l a distância entre apoios em mm, b a largura do provete e d a altura em mm.

Quanto maior for o valor da resistência à tração por flexão, melhor a resistência à fendilhação, porém, há que ter em conta a compatibilização dos valores com o resto do suporte onde se vai injetar a calda.

Para caldas de cal hidráulica com uma dosagem de água (a/l) de 0,5, obtiveram-se valores de resistência à tração por flexão de 3 MPa (Gouveia, 2017). A ficha técnica do produto de Mapei (Mape-Antique I) que é uma calda comercial à base de ligante hidráulico com filler, isento de cimento, confirma um valor semelhante indicando uma resistência à flexão de 4 MPa aos 28 dias.

Para caldas à base de cimento, os valores obtidos em regra são o dobro, 8,6 MPa (Silva, 2010) para uma razão a/l de 0,5. Isto reforça a ideia que um excesso de rigidez pode não ser compatível com paredes de alvenaria antiga.

O ensaio de resistência à tração por flexão não é um ensaio fundamental para a caracterização de caldas de injeção tendo em conta que funcionam principalmente à compressão e que as suas características reológicas, químicas e mecânicas (aderência) são mais importantes.

6.2.3. Resistência à compressão

O ensaio de resistência à compressão permite obter valores máximos que um material resiste quando é comprimido. Tendo em conta que as caldas funcionam na sua maioria sobre compressão, aguentando com a carga própria e da estrutura, os valores obtidos tornam-se importantes na caracterização das caldas de injeção.

O ensaio de resistência à compressão segue a norma EN 1015-11:1999a. Coloca-se entre duas placas um provete, de seguida, aumenta-se o carregamento até à sua rotura.



Figura 6.2 Esquema do ensaio de resistência à compressão (W33)

Os valores da resistência à compressão são obtidos com a seguinte expressão:

$$R_c = \frac{F_c}{A}$$

Onde R_c é a resistência à compressão em MPa, F_c a carga última de compressão em kN e A a área comprimida em m^2 .

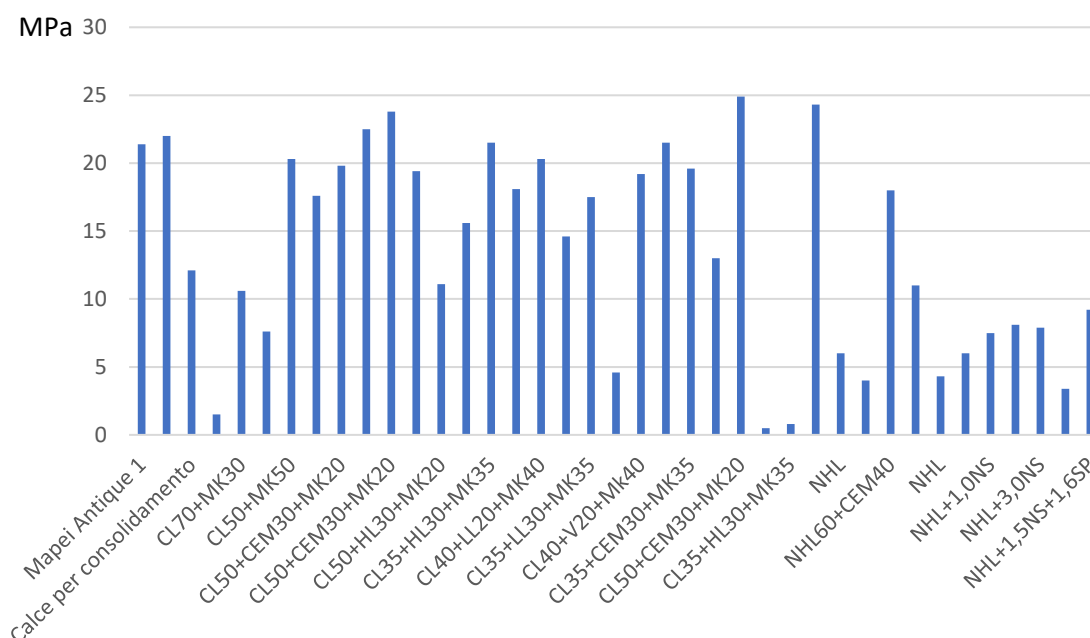
As caldas injetadas devem melhorar a resistência mecânica da parede onde vão ser injetadas. Porém, uma calda de injeção com uma resistência mecânica muito elevada como uma calda de cimento vai possuir uma rigidez demasiado elevada que pode não ser compatível com o local onde se vai injetar, principalmente se só uma zona de uma parede de alvenaria é intervencionada.

Silva (2010) estudou a variações do desempenho de caldas à base de cimento aumentando a razão a/l comparando também com caldas de cimento preparadas em obra. Constata que o melhor desempenho de resistência à compressão aos 28 dias acontece para uma razão de 0,4 obtendo 52,7 MPa e de 33,5 MPa para uma razão de 0,5. Para caldas de cimento preparadas em obra com uma razão de 0,5 obteve valores na ordem dos 20 MPa aos 4 dias.

Tanto Gomes (2016) como Gouveia (2017), que fizeram os ensaios de resistência à compressão aos 28 dias com caldas à base de cal hidráulica natural e obtiveram valores de 6 MPa e 4,3 MPa. Gomes (2016) estudou também misturas de cal (60%) e cimento (40%) obtendo valores de 18 MPa. Gouveia (2017) obteve um desempenho melhor com a introdução de nano-sílica na calda chegando aos 8,1 MPa para uma percentagem de 1,5% de nano-sílica. Os resultados obtidos com a introdução de sílica de fumo são muito semelhantes (Duran et al, 2014, Qing et al., 2007, Baltazar et al., 2014). Este aumento de resistência à compressão explica-se pela nano-sílica levar a reações acentuadamente pozolânicas por meio da reação com $Ca(OH)_2$ resultando na formação de estruturas adicionais de silicato de cálcio hidratado (CSH) (Gouveia, 2017), ou seja, apresenta uma menor porosidade que uma calda à base de cal sem sílica de fumo traduzindo-se num melhor comportamento à compressão.

Luso (2012) efetuou um estudo extenso de caldas com diferentes misturas de cal hidratada, cimento e metacaulino. Os valores de resistência à compressão obtidos em todos os ensaios foram adequados variando entre os 5 e os 20 MPa. Porém, a autora conclui que as características mecânicas das caldas não devem ser um fator decisivo para a escolha deste material, as suas propriedades de aderência são fundamentais no estudo de caldas para injeção em alvenarias antigas.

O reboco interior tem características mecânicas de compressão entre 0,4 e 2,5MPa (Veiga e Santos, 2015). A calda a injetar deve ter um desempenho mecânico mais elevado que o desempenho da argamassa existente e compatível. Características mecânicas demasiado altas, que é o caso de caldas de cimento, provocam uma rigidez demasiado elevada para alvenarias antigas. Caldas de cal aérea ou hidráulica são assim as mais apropriadas para a consolidação de paredes de alvenaria antigas por injeção de caldas.



Nota: CL= Cal hidratada, CEM=cimento Portland, MK= Metacaulino, HL e NHL= cal hidráulica natural, LL= filler calcário, V= cinzas volantes, SP= superplastificante, NS= nano-sílica

Figura 6.3 Resistência à compressão aos 28 dias de provetes com diferentes misturas (Luso, 2012; Gomes, 2016; Gouveia, 2017)

6.2.4. Aderência

A utilização de caldas na consolidação e reforço de estruturas de alvenaria é eficaz principalmente pela promoção da aderência entre as caldas de injeção e os elementos constituintes da alvenaria. Assim, é importante analisar a aderência entre a calda utilizada e o material pétreo e entre a calda e as argamassas existentes ou outros materiais soltos.

Não existindo um protocolo normalizado para estudar a aderência de caldas de injeção, o ensaio do arrancamento (ASTM C952: 2012) é o mais apropriado para a quantificar esta propriedade. Este consiste em determinar a força de tração máxima que é necessária

para arrancar uma área circular de calda (de 48mm de diâmetro) de um suporte (cerâmico, pedra, etc) (figura 6.4 e 6.5). Podem acontecer vários tipos de roturas: por desligamento na ligação, na interface da ligação e pela rotura coesiva do suporte. Este último permite concluir que a ligação é mais resistente que o suporte. A rotura por desligamento ocorre quando a separação entre o suporte e a calda é evidente, ou seja, permanece alguma calda na superfície onde se faz o ensaio. Ocorre quando a aderência entre os dois materiais é fraca. A rotura na interface de ligação ocorre quando permanece calda no suporte após a rotura, ou seja, a rotura faz-se na calda por resistência à flexão insuficiente.

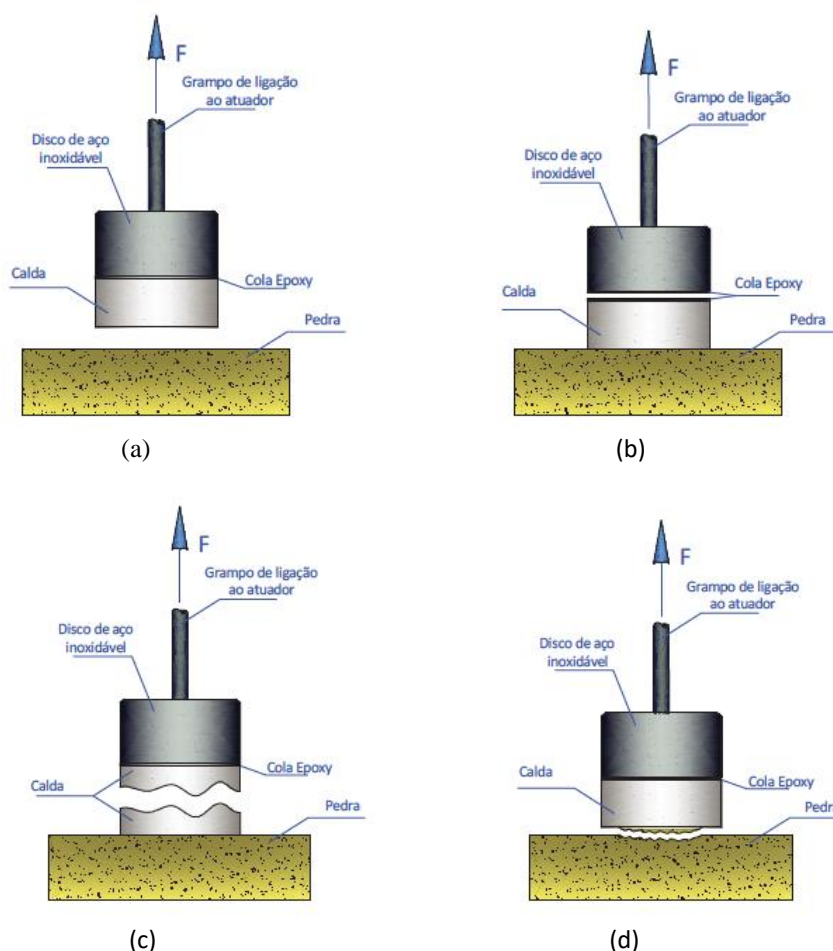


Figura 6.4 Esquemas das roturas possíveis no ensaio de aderência: a) desligamento na ligação b) pela ligação cola-calda c) pela calda d) pela ligação calda-pedra (Luso, 2012)

Os suportes são preparados sendo limpos e podendo variar o teor de humidade colocando-as em câmaras húmidas ou não. De seguida, coloca-se a calda em estudo num molde circular sobre o suporte até obter uma espessura de cerca de 2cm. O processo de cura é feito em câmara húmida para ter condições de temperatura e humidade relativa constantes. Por fim, os ensaios são feitos aos 28 e 90 dias de idade com um equipamento de tração.

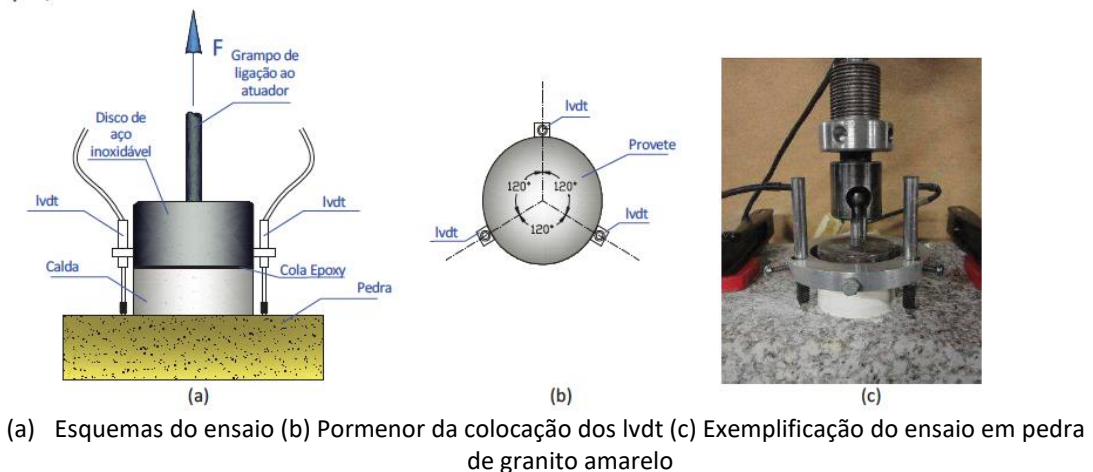


Figura 6.5 Esquema do ensaio de aderência calda/pedra (Luso, 2012)

Obtêm-se gráficos tensão vs. extensão tendo em conta que é preciso considerar o tipo de arrancamento ocorrido: se for pela cola que liga o grampo à calda não se considera o ensaio. Se a rotura ocorrer no seio da calda ou do suporte, o ensaio é considerado um sucesso.

Os valores de tensão de rotura média à tração podem ser comparados entre as diferentes caldas podendo concluir nos seus desempenhos em aderir. A capacidade de aderência depende de 3 fatores principais em relação à superfície onde se vai aplicar: (i) a porosidade da pedra, (ii) a sua rugosidade e (iii) o seu teor em humidade (Luso, 2012).

Alguns estudos com caldas comerciais à base de cal e caldas formuladas em laboratório com cal e cimento dão nos uma ordem de ideia de valores de aderência (tabela 6.2).

Duas caldas laboratoriais, uma com 17,5% de cal hidratada, 30% de cimento e 52,5% de metacaulino e outra com 35% de cal hidratada, 30% de cimento e 35% de metacaulino apresentam valores de 0,28 MPa e 0,87 MPa aos 90 dias numa superfície de granito húmida a 1,3%.

Tabela 6.2 Tensão e tipo de rotura em função da calda (Luso, 2012)

SUPORTE	ESTADO DE HUMIDADE DA PEDRA	CALDA	TENSÃO DE ROTURA MÉDIA À TRAÇÃO (MPa) 28/90 DIAS	TIPO DE ROTURA 28/90 DIAS	OBSERVAÇÕES
GRANITO	"Húmido" (H=1,3%)	CL50+CEM30+MK20	0,20/0,21	Interface/interface	Apenas 2 provetes aos 90 dias
		CL17,5+CEM30+MK52,5	0,22/0,28	Interface/interface	-
		CL35+CEM30+MK35 (5,5% plastificante)	-/0,16	-/interface	Soltaram-se na desmoldagem aos 28 dias
		CL35+CEM30+MK35 (3,33% plastificante)	0,92/0,87	Pedra/pedra	Num dos provetes, aos 90 dias, a rotura deu-se pela cola

Nota: CL= Cal hidratada, CEM=cimento Portland, MK= Metacaulino,

O mesmo ensaio com caldas comerciais à base de cal hidráulica apresentam os seguintes valores, evidenciando a primeira mistura com cal da Mapei Antique 1 que apresenta valores de resistência aos 90 dias em granito húmido de 1,26 MPa.

Conclui-se que os resultados de caldas de cal hidráulica têm um desempenho melhor a nível da aderência que misturas com cimento e cal formuladas em laboratório.

6.2.5. Resistência aos sais solúveis

Os sais solúveis são uma das principais razões da degradação de caldas. A expansão dos sais durante a sua secagem provoca alterações volumétricas provocando fendas e fissuras que por sua vez permitem a entrada de mais sais. Para quantificar a resistência de um material aos sais pode procede-se a um ensaio de resistência ao ataque por cloretos ou a sulfatos segundo a norma NP EN 12379:2001. Utilizando uma solução com o sal em causa num recipiente estanque, colocam-se os provetes imersos na solução. De seguida procede-se a 15 ciclos que começam com a pesagem dos provetes, imersão destes na solução, colocação numa estufa a 105±5°C durante um mínimo de 36 horas, deixam se arrefecer durante duas horas e pesam-se uma segunda vez.

A variação da massa dos provetes é dada da seguinte forma:

$$V.M. = \frac{m_i - m_0}{m_0} \times 100$$

Onde a variação de massa V.M. vem em percentagem, m_i é a massa do provete no ciclo i e m_0 a massa inicial do provete em gramas.

Com os dados obtidos é possível relacionar a variação de massa de diferentes provetes com diferentes materiais com um gráfico relacionando a variação de massa em percentagem em função do número de ciclos do ensaio.

Tanto Cardoso (2018) como Gouveia (2017) realizaram ensaio de resistência ao ataque por cloretos para provetes de cal hidráulica com a adição de nano-sílica porém obtiveram resultados opostos. Gouveia (2017) concluiu que com o aumento de dosagem de nano-sílica, a resistência ao ataque por cloretos melhora, Cardoso (2018) concluiu o oposto. Botas (2019) realizou os mesmos ensaios com cal hidráulica natural com a adição de microesferas de vidro ou de fibras de polipropileno. Os provetes com microesferas de vidro degradaram se ao mesmo ritmo que o provete de referência composto de cal hidráulica natural. No entanto, a adição de fibras de polipropileno proporciona uma melhor ligação não ocorrendo fenómenos de destaque. Temporão (2019), integrou geopolímeros na cal hidráulica natural obtendo resultados piores do que os provetes de referência sem geopolímeros, resultados iguais aos de Dias (2012) que ensaiou com argamassas geopoliméricas à base de cinzas volantes.

6.3. Propriedades físicas

6.3.1. Porosidade aberta

A porosidade aberta é a relação entre o volume de vazios acessíveis à água e o volume aparente da amostra, ou seja, o volume da massa sólida mais o volume de vazios. A porosidade indica, portanto, a compactidade de uma calda, quanto menor o valor da porosidade aberta mais compacto é o material, logo, maiores as resistências mecânicas e o módulo de elasticidade da calda.

O ensaio de determinação da porosidade aberta é realizado segundo a norma NP EN 1936:2008. Começa com a colocação de provetes numa estufa a $100 \pm 5^\circ\text{C}$ durante 24 horas para a sua secagem, depois de retirar da estufa limpa-se o material granular solto e insere-se o provete num exsicador com bomba a vácuo para retirar o ar durante mais 24 horas. Mede-se então a sua massa seca M_1 . De seguida, adiciona-se água no exsicador através de uma mangueira até os provetes estarem completamente submersos mantendo-se o vácuo durante mais 24 horas. Passadas as 24 horas de submersão, desliga-se a bomba deixando os provetes submersos, mas à pressão atmosférica durante mais 24 horas. Por fim, executam-se mais duas pesagens: a massa em imersão M_2 e massa saturada M_3 . A pesagem hidrostática é obtida pesando o provete imerso sobre um cesto de rede suspenso numa balança. De seguida, retira-se o provete da água, limpam-se as superfícies de água em excesso e pesa-se o provete.



(a)



(b)



(c)



(d)

a) Exsicador e bomba de vácuo b) imersão dos provetes c) pesagem hidrostática M_2 d) determinação da massa saturada M_3

Figura 6.6 Exemplo dum ensaio para obter a porosidade aberta (Páscoa, 2012)

A porosidade aberta é obtida com base na expressão:

$$P_{ab} = \frac{M_3 - M_1}{M_3 - M_2} \times 100$$

A porosidade aberta P_{ab} vem em percentagem. A massa M_1 é a massa do provete seco, M_2 a massa do provete em imersão e M_3 a massa do provete saturado, em gramas.

Para uma argamassa de cal aérea, o valor de porosidade aberta é cerca de 30% (Faria, 2004; Rato, 2006; Guerreiro et al., 2007; Pinho, 2007; Barreto, 2010), este valor diminui com a adição de fillers como cinzas volantes baixando para os 20% (Mana, 2013) ou com a adição de nano-sílica (Gouveia, 2017). A introdução de geopolímeros numa calda à base de cal hidráulica também diminui a sua porosidade aberta com o aumento da dosagem (Temporão, 2019). Uma calda de calda hidráulica natural apresenta valores de porosidade aberta entre os 40% e os 50%. A adição de nano-sílica, cinzas volantes ou fibras de polipropileno tende a diminuir a porosidade aberta da calda pela dimensão mais pequena destas adições ou por reações químicas que favorecem a compacidade (Temporão, 2019; Botas, 2019; Cardoso, 2018)

6.3.2. Absorção de água por capilaridade

A absorção de água por capilaridade permite definir a influência da água líquida numa calda. Com este ensaio consegue-se definir o coeficiente de capilaridade e a sorptividade de um material. O coeficiente de capilaridade indica a quantidade de água absorvida enquanto que a sorptividade indica a velocidade de absorção de água.

O ensaio é executado segundo a norma EN 1015-18:2002. O ensaio começa com a preparação dos provetes colocando-os em estufa durante 24 horas para garantir a sua secagem completa. O ensaio ocorre num tabuleiro nivelado com uma lâmina de água na sua base e uma rede de borracha permitindo a passagem de água onde se vão colocar as bases dos provetes. Os dados retirados do ensaio são as massas dos provetes, desde o momento inicial onde medimos a massa seca, de seguida medem-se as massas de 5, 10, 15, 30 min e 1 hora, depois de hora em hora até às 8 horas e de seguida a cada 24 horas.



Figura 6.7 Exemplo do ensaio para determinar a absorção de água por capilaridade de meios porosos injectados com calda(W48)

A seguinte expressão permite de calcular o coeficiente de absorção de água segundo a AFNOR (1980):

$$C = \frac{m_{sat} - m_{seco}}{A\sqrt{t}} \times 10^3$$

O coeficiente de absorção de água por capilaridade (C) vem em $\text{kg/m}^2 \cdot \text{min}^{0,5}$, a massa dos provetes secos e a massa dos provetes após a absorção de água por capilaridade em gramas, A sendo a área dos provetes em contacto com a água em mm^2 e t o tempo em horas.

Segundo a norma EN 1015-18:2002, o coeficiente pode também ser obtido da seguinte forma:

$$C = 0,1 \times (m_2 - m_1)$$

Onde m_2 é a massa do provete aos 90 minutos e m_1 aos 10 minutos.

A porosidade aberta e a porometria influenciam diretamente a absorção por capilaridade (Jorne et al., 2012). Assim, a adição de materiais de dimensões muito pequenas como a nano-sílica diminuem a porosidade e consequentemente a capilaridade (Gouveia, 2017). Pretende-se que os valores de capilaridade e sorptividade sejam os menores possíveis. A ordem de valores do coeficiente de capilaridade para argamassas de cal aérea é de $2,5 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{min}^{0,5}$ e de $2,8 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{min}^{0,5}$ para argamassas de cal hidráulica. Para caldas de cal hidráulica, estes valores variam entre os $1,5 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{min}^{0,5}$ e os $2,0 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{min}^{0,5}$ (Temporão, 2019; Botas, 2019).

6.3.3. Secagem

No ensaio de secagem pretende-se quantificar a quantidade de água que um provete saturado perde ao longo do tempo.

O ensaio é executado segundo a norma EN 16322:2013. Numa câmara seca à temperatura de $20 \pm 2^\circ\text{C}$ e humidade relativa de $55 \pm 5\%$ colocam-se os provetes num tabuleiro revestido de película aderente no seu fundo. O lado do provete que esteve em contacto com a água no ensaio de capilaridade deve ser colocado do lado de cima. De seguida, medem-se as massas dos provetes a cada hora nas 8 primeiras horas e de seguida a cada 24 horas até que os valores se estabilizem. Com estes dados podem-se elaborar curvas de secagem que mostram a evolução do teor de água em percentagem ao longo do tempo.

Pode obter-se o índice de secagem com a seguinte expressão:

$$IS = \frac{\sum_{i=1}^{i=n} [(t_i - t_{i-1}) \times \frac{W_{ti-1} + W_{ti}}{2}]}{W_{max} \times t_f}$$

Onde t_i é o tempo decorrido em i minutos depois do início do ensaio, W_i o teor em água correspondente ao instante i em percentagem, W_{max} o teor em água correspondente ao valor máximo do ensaio (ou seja no início do ensaio) e t_f o tempo final do ensaio em minutos.

O índice de secagem para argamassas de cal hidráulica é de 0,3 (Fontes, 2013; Carneiro, 2012) e as argamassas de cal aérea apresentam valores médios de 0,1 (Torres et al., 2014). Quanto menor o índice, mais rapidamente acontece o processo de secagem. Gomes (2016), realizou o ensaio de secagem com caldas para injeção incorporando óleo de linhaça não obtendo resultados de índice de secagem diferentes concluindo que o óleo de linhaça não acelera nem atrasa o processo de secagem. Gouveia (2017) introduziu nano-sílica nas suas misturas de caldas para injeção à base de cal hidráulica obtendo resultados de secagem piores, ou seja, mais lentos que misturas à base de cal sem a mesma adição. Este resultado pode ser explicado pela maior compacidade que dificulta o processo de secagem. Este fenómeno de redução da porometria dificultando a secagem acontece também em caldas de injeção cimentícias (Alves, 2016). A adição de geopolímeros em caldas de cal hidráulica também piora o fenómeno de secagem (Temporão, 2019).

6.3.4. Termogravimetria

A análise termogravimétrica é um ensaio no qual se monitoriza a variação de massa de uma substância em função da temperatura e do tempo num ambiente de temperatura e atmosfera controlada.

A decomposição do material ocorre em várias etapas visíveis nos gráficos obtidos pelo software do equipamento utilizado. Estes gráficos mostram a variação de massa em função da temperatura nas abcissas. Usualmente, observam-se nos gráficos as curvas termogravimétricas das caldas à base de ligantes inorgânicos quatro picos. O primeiro pico é associado à perda de água quimicamente interligada aos produtos de hidratação. O segundo pico é devido à desidroxilação, ou seja, a perda de água relacionada com o hidróxido de cálcio. Por fim, o terceiro e último pico é provocado pela descarbonatação onde é libertado o dióxido de carbono do carbonato de cálcio (Matos, 2013).

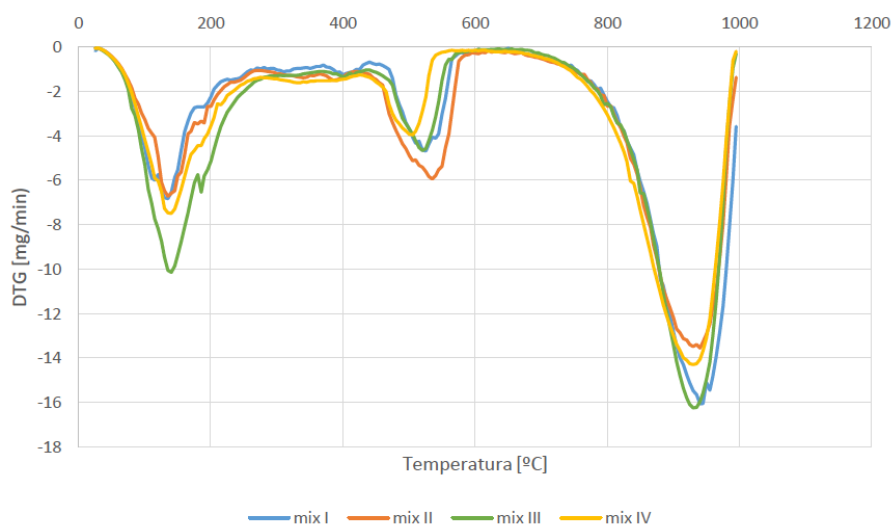


Figura 6.8 Exemplo de curvas de ensaio de termogravimetria em caldas de NHL (Gomes, 2016)

6.4. Considerações finais das propriedades da calda endurecida

As caldas para injeção de alvenarias antigas devem apresentar certas características para concretizar os seus objetivos. Uma das características mais importante é a sua capacidade de aderir eficazmente ao suporte. Outras características próprias da calda podem influenciar negativamente a sua aderência ao suporte como é o caso da sua retração, que deve ser mínima, e o seu comportamento face à presença de humidade e água, é necessária uma boa estabilidade volumétrica. Em relação às suas características mecânicas, a rigidez da calda injetada no seu estado endurecido deve ser igual ou ligeiramente superior à rigidez da argamassa original da parede. Para tal, um estudo do módulo elástico dinâmico, da sua resistência à compressão e à tração deve ser feito para garantir que a calda injetada é compatível com a alvenaria antiga. Todas estas características estão ligadas entre si, os materiais usados em caldas mais recentes, especialmente o cimento, costuma ter resistências mecânicas incompatíveis com paredes antigas.

Tabela 6.1 Ensaio para a determinação das propriedades da argamassa endurecida (Perret et al., 2003; Luso, 2012)

PROPRIEDADE	NORMA	DESCRIÇÃO
ADERÊNCIA RESISTÊNCIA À TRAÇÃO	ASTM C952 (2012) EN 1015-11 (1999))	<ul style="list-style-type: none">• Ensaio de aderência alvenaria/argamassa• Ensaio de resistência à tração indireta através da compressão longitudinal de um provete cilíndrico com areia injetado com calda
RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO	ASTM C942 (2010) NP EN 1015-11 (1999)	<ul style="list-style-type: none">▪ Ensaio de compressão a provetes de calda até à rotura
DURABILIDADE	ASTM C267(2006)	<ul style="list-style-type: none">▪ Avaliação dos efeitos das condições locais nas propriedades das argamassas (variação da massa da amostra, alterações de aparência, etc.)
CAPILARIDADE	ASTM C1403 (2006) EN 1015-18 (2002)	<ul style="list-style-type: none">▪ Avaliação da percentagem em massa de água absorvida numa amostra de argamassa. Dedução aproximada de um valor para a porosidade da amostra.

7. Influência de fatores externos na injeção de caldas

7.1. Considerações iniciais

As propriedades reológicas de caldas de injeção, como visto anteriormente, são de extrema importância para o sucesso da operação de consolidação: a capacidade de escoar e preencher o meio poroso onde é injetado. As suas características reológicas podem ser definidas por dois fatores: a tensão de cedência e a sua viscosidade plástica. Neste sentido, pretende-se com este capítulo evidenciar como diferentes temperaturas ambientes, o tempo de repouso da calda antes da sua injeção e a pressão de injeção influenciam os dois parâmetros reológicos.

7.2. Efeito da temperatura

A temperatura ambiente é um fator que dificilmente se controla na injeção de calda dependendo do local, da estação e das horas a que se trabalha. Consequentemente, é importante saber da influência da temperatura nas características reológicas das caldas para uma injeção eficaz.

É esperado que a calda tenha um comportamento ótimo a uma temperatura de 20°C (Brás e Henriques, 2010) com os menores valores de viscosidade plástica e tensão de cedência comparando com o estado da mesma calda a temperaturas de 5°C e 35°C. A baixas temperaturas, é possível que se formem cristais de gelo pela aproximação da temperatura de congelação da água. A agitação molecular diminui com a temperatura provocando um aumento da tensão de cedência e viscosidade plástica, ou seja, uma menor fluidez e injetabilidade da calda (Guerreiro, 2014). Resultados semelhantes foram obtidos por Jorne (2016). Ensaios de injetabilidade foram feitos a diferentes temperaturas obtendo os melhores resultados de capacidade de injeção para temperaturas de 20°C. A figura 7.1 ilustra bem os resultados obtidos por Jorne. Observa-se os piores resultados de injetabilidade para temperaturas altas (40°C) e baixas (5°C) enquanto que os melhores resultados são obtidos para temperaturas entre os 20°C e os 30°C.

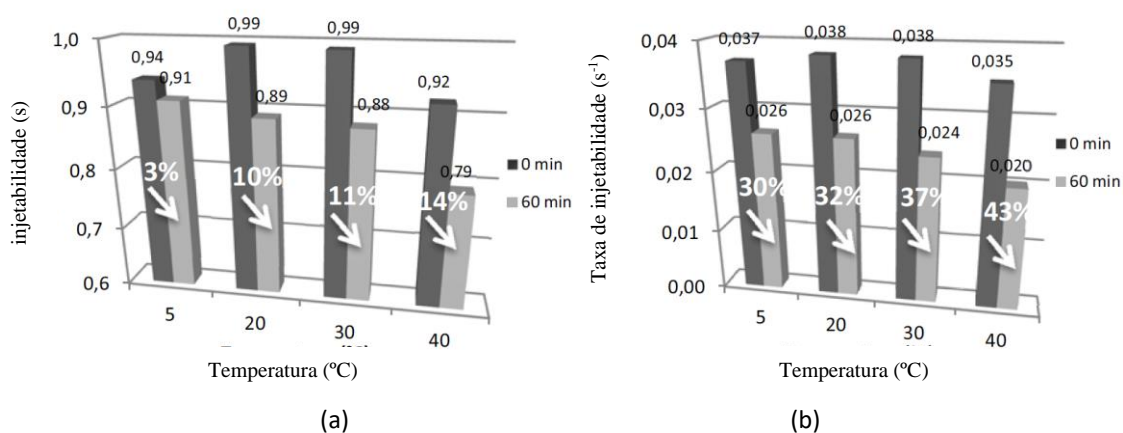


Figura 7.1 Influência da temperatura e tempo de repouso na injetabilidade de uma calda (a) e a taxa de injetabilidade (b) para caldas com 1,2% de superplastificante e pressão de injeção de 1 bar (Jorne, 2016)

Para temperaturas elevadas (40°C), as características reológicas são as piores com a menor injetabilidade. Este fenómeno é explicado pela elevada quantidade de água que é evaporada da calda durante a injeção aumentando a fricção e colisão entre as partículas que por sua vez provoca o aumento da tensão de cedência (Jorne et al 2015). As elevadas temperaturas também aceleram as reações de hidratação causando a perda de trabalhabilidade e fluidez.

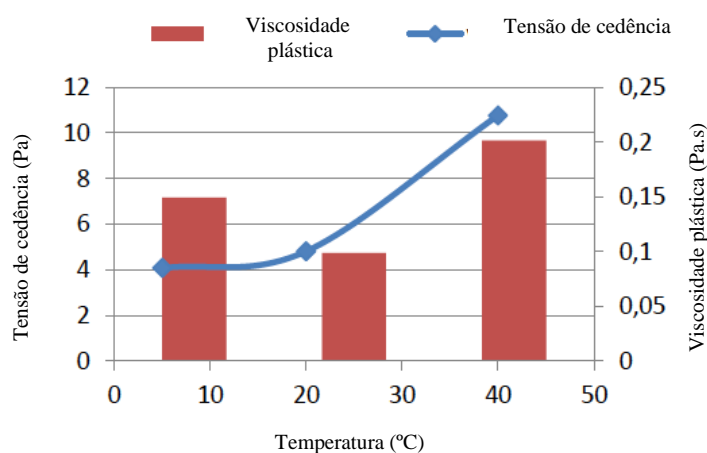


Figura 7.2 Efeito da temperatura na tensão de cedência e viscosidade plástica de uma calda de cal hidráulica (adaptado de Jorne, 2014)

7.3. Efeito do tempo de repouso

O tempo de repouso é o tempo entre a amassadura da calda e a sua injeção. A injeção de uma calda fresca com muito pouco tempo de repouso apresenta sempre melhores resultados em relação às suas características reológicas. A floculação é uma das causas de um desempenho pior, as forças de atração maiores entre as partículas do ligante não promove a dispersão da calda piorando a sua injetabilidade (Guerreiro, 2014). A influência do tempo de repouso nas caldas porém, está intrinsecamente relacionado com a temperatura ambiente. Quanto maior a temperatura, menor poderá ser o tempo de repouso, assim, para uma temperatura de 5°C um tempo de repouso de 60 minutos não influencia dramaticamente a

injetabilidade (Guerreiro, 2014). A temperaturas mais elevadas, 20°C e 40°C, o estado de flocculação após 60 minutos de repouso já é mais avançado, resultado de reações de hidratação aceleradas, piorando a injetabilidade da calda e criando zonas onde a calda não consegue chegar.

Os resultados experimentais realizados por Jorne (2016) mostram os mesmos resultados para a injetabilidade de caldas com tempos de repouso de 60 minutos. Nota-se numa queda acentuada na sua injetabilidade na ordem dos 15% para temperaturas altas (40°C) e de 3% para temperaturas baixas (5°C). Os resultados explicam-se pelo fenómeno de flocculação. Segundo Wallevik (2009), existem dois tipos de fenómenos de flocculação: reversível e permanente. Quanto maior o tempo de repouso, mais ligações entre o ligante se tornam permanentes piorando a capacidade de penetração da calda e, consequentemente, a sua fluidez.

7.4. Efeito da pressão de injeção

A pressão de injeção é a força que permite a penetração da calda na alvenaria, quanto maior a pressão, mais rapidamente e facilmente a calda será injetada. A injeção rápida permite uma menor perda da água por absorção e as partículas que compõe a calda permanecerão melhor em suspensão. Porém, a pressão interna da calda introduz tensões cujas alvenaria poderá não resistir (Van Rickstal, 2000). Assim, aumentando demasiado a pressão pode causar danos estruturais como a queda de um dos panos exteriores. A pressão de injeção adicionada à pressão hidrostática equivalem a uma pressão total que pode não ser resistida pela alvenaria antiga (figura 7.3).

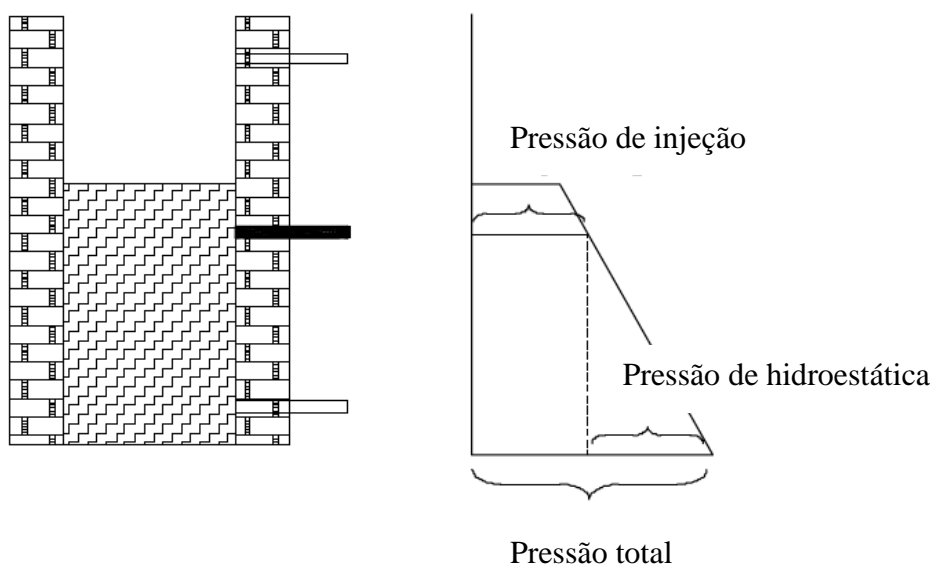


Figura 7.3 Efeito da pressão de injeção na pressão total de uma parede (adaptado de Van Rickstal, 2000)

Na tabela 7.1 apresentam-se valores de pressões de injeção encontradas na literatura para dar uma ordem de grandeza:

Tabela 7.1 Pressões de injeção encontradas na literatura (Jorne, 2016; Brás, 2012)

AUTOR	PRESSÃO (BAR)	TIPO DE CALDA
FEILDEN (1982)	2.0	Cal + cinzas volantes + cimento
VOGIATZIS (1989)	1.0	Cimento + areia fina + SP
TOMAZEVIC (1992)	2.0	Cimento + pozolanas
BINDA (1993)	3.5	Cal hidráulica + aditivos
GIL (1994)	1.0	Microcimento + SP
BINDA ET AL. (1997)	0.2 a 0.6	Microcimento
BINDA ET AL. (1997)	0.2 a 0.6	Cal hidráulica
BINDA ET AL. (1997)	0.2 a 0.6	Cal hidráulica+pó de tijolo
VAN RICKSTAL (2000)	1.0	Cimento + SP
VALLUZZI ET AL. (2004)	0.5	Cal hidráulica + SP
VALLUZZI (2005)	0.5	Cal hidráulica
CORRADI ET AL. (2008)	1.0	Cal hidráulica
KALAGRI ET AL. (2010)	0.75	Cal hidráulica + SP
BRAS E HENRIQUES (2012)	1 a 2	Cal hidráulica
BRAS ET AL. (2013)	1.0	Cal hidráulica
BALTAZAR ET AL (2014)	1.0	Cal hidráulica naural + SP + Sílica de fumo

*SP= Superplastificante

Um aumento de pressão de injeção aumenta a velocidade de penetração da calda que se traduz num preenchimento maior dos vazios, porém, o aumento de pressão provoca um aumento das características reológicas (figura 7.4): tensão de cedência e viscosidade plástica (Baltazar et al. 2014a). Assim, poderia-se deduzir que a melhor pressão de injeção é a menor dum ponto de vista reológico, porém, iria-se observar uma fraca penetração dos vazios.

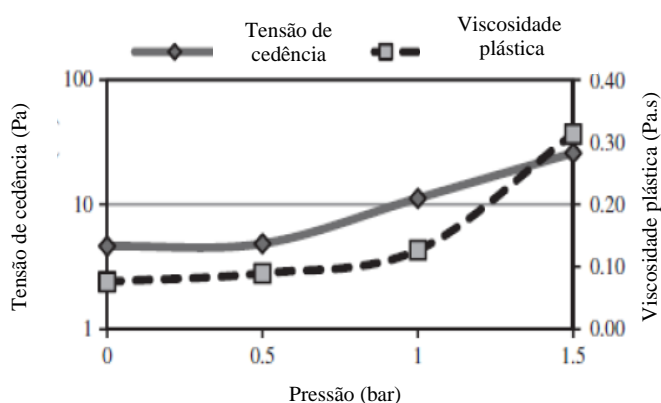


Figura 7.4 Efeito da pressão de injeção na tensão de cedência e viscosidade plástica de uma calda de cal hidráulica (adaptado de Baltazar et al., 2014a)

A pressão de injeção ideal, para caldas de cal hidráulica situa-se entre os 0,5 bar e os 1,5 bar permitindo uma boa injeção sem riscos de pressões demasiado elevadas na alvenaria (Binda, 1997; Brás, Henriques, 2012; Valluzi, 2005).

Jorne (2016) realizou ensaios de injetabilidade para diferentes pressões de injeção a diferentes temperaturas para uma mesma calda e concluiu que o aumento de pressão de

injeção aumenta a velocidade de injeção porém, a percentagem de vazios não melhora significativamente. Como se observa na figura 7.5, a injetabilidade varia muito pouco para pressões de injeção de 0,5 bar, 1 bar e 2 bar.

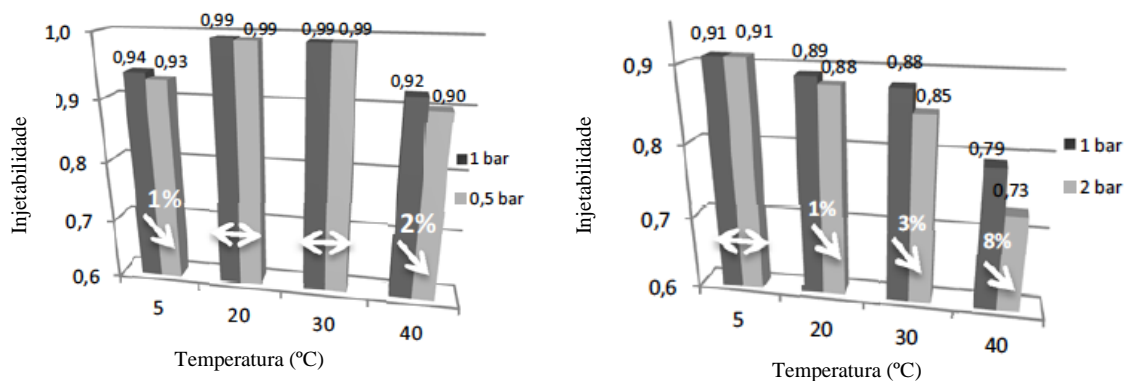


Figura 7.5 Influência da pressão de injeção na injetabilidade de uma calda com 1,2% de superplastificante e 0 minutos de tempo de repouso a diferentes temperaturas e diferentes pressões (adaptado de Jorne, 2016)

Assim, constata-se que o aumento de pressão de injeção não melhora a capacidade de preenchimento de vazios de uma parede e pode mesmo provocar danos estruturais. Para caldas frescas com pouco tempo de repouso e temperaturas entre os 20°C e os 30°C, uma pressão de injeção de 0,5 bar parece ser indicada para minimizar riscos de sobre pressão e maximizar o preenchimento de vazios.

7.5. Características do meio poroso

A eficácia da injeção de caldas depende de diversos fatores revistos neste trabalho desde à composição da mistura da calda à qualidade do trabalho de injeção no terreno. Para definir os parâmetros mais eficientes para uma injeção de qualidade é importante conhecer bem o tipo de parede onde se vai injetar (Valluzzi, 2005), mas também os materiais que a constituem, e a dimensão, percentagem e distribuição dos vazios e fendas (Binde et al., 2003).

Várias conclusões podem ser tiradas do estudo do meio poroso na eficácia da injeção de caldas segundo Jorne (2016). A quantidade de água absorvida pelo meio poroso influencia a fluidez e capacidade de injeção da calda. Assim, melhorar previamente pode melhorar a velocidade de injeção da calda mas não melhora a penetrabilidade dos poros de dimensões mais pequena porque estes já se encontram cheios de água devido á pressão capilar (Van Rickstal, 2000). A injetabilidade de uma calda depende principalmente dos seguintes fatores:

- permeabilidade do meio poroso
- volume de vazios
- dimensão das partículas finas
- capacidade de absorção de água
- superfície específica

A permeabilidade depende do rácio entre a tamanho dos vazios do meio poroso e do tamanho da maior partícula na calda de injeção. Este rácio já foi bastante estudado na

literatura obtendo várias equações que permitem de definir o tamanho máximo das partículas da calda em função do diâmetro ou tamanho dos canais do meio poroso (figura 7.6).

Assim, o rácio toma a seguinte forma:

$$d < W_{nom}/n$$

Onde d é a dimensão da maior partícula sólida da calda, W_{nom} é o diâmetro representativo dos canais de acesso do meio poroso e n é o rácio. W_{nom} é um valor que pode não ser fácil de determinar, especialmente num meio granular daí que a seguinte equação de Dantu (2016) permite de assumir uma aproximação:

$$W_{nom} \sim 0.15 * D_{15}$$

Onde D_{15} corresponde ao diâmetro do caminho mais pequeno em grãos do mesmo tamanho.

Portanto, para definir o diâmetro da maior partícula da calda em função do meio poroso, a tabela 7.2 indica as diferentes equações obtidas por diferentes autores em função do meio poroso.

Tabela 7.2 Condições de penetrabilidade de partículas segundo diferentes autores (Miltiadou-Fezans & Tassios, 2013)

AUTOR	EQUAÇÃO	MEIO POROSO
JOHNSON (1958)	$d_{85} < W_{nom}/3.75$	SOLO GRANULAR FINO
MITCHELL (1970)	$d_{100} < W_{nom}/3$	MEIO FISSURADO
LITTLEJOHN (1983)	$d_{85} < W_{nom}/3.75$	SOLO GRANULAR FINO
LITTLEJOHN (1983)	$d_{100} < W_{nom}/5$	MEIO FISSURADO
HUTCHINSON (1981)	$d_{max} < W_{nom}/3$	SOLO GRANULAR FINO
CAMBEFORT (1977)	$d_{100} < W_{nom}/1.5 \text{ a } 2$	MEIO FISSURADO
LÉONARD (1961)	$d_{85} < W_{nom}/0.75 \text{ a } 3$	SOLO GRANULAR FINO
PAPADAKIS (1959)	$d_{100} < W_{nom}/1.5 \text{ a } 3$	SOLO GRANULAR FINO
PAILLÈRE & GUINEZ (1984)	$d_{100} < W_{nom}/1.5 \text{ a } 2.3$	TESTES NUMA "COLUNA DE AREIA"
MILTIADOU-FEZANS (2013)	$d_{85} < W_{nom}/5 \pm 1$	TESTES NUMA "COLUNA DE AREIA"
MILTIADOU-FEZANS (2013)	$d_{99} < W_{nom}/2$	TESTES NUMA "COLUNA DE AREIA"

NOTA: d_{85} é o diâmetro da partícula da calda correspondendo a uma passagem de 85%
 d_{100} ou d_{max} corresponde ao diâmetro máximo das partículas da calda

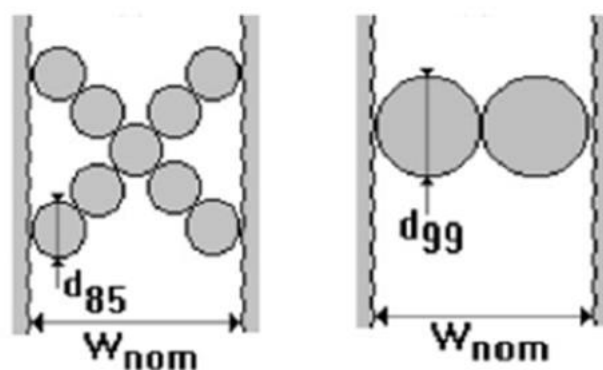


Figura 7.6 Esquema representativo das dimensões das maiores partículas passando num poro (Miltiadou-Fezans & Tassios, 2013a)

Se a maior partícula da calda não passar no poro, este é obstruído e a injeção perde eficácia (figura 7.7). Assim, a dimensão das partículas finas (0,15 a 2 mm) é importante para uma boa consolidação por injeção de calda. Porém, uma percentagem demasiado elevada do material fino (superior a 33%) pode afetar negativamente o processo de injeção tendo em conta que as partículas finas tendem a aglomerar-se diminuindo os diâmetros dos poros (Jorne, 2016). Para meios porosos finos, Jorne constata que a tensão de cedência é o fator mais relevante para a injeção da calda enquanto que em presença de um meio poroso mais grosseiro, a viscosidade e inércia são as características de maior importância.

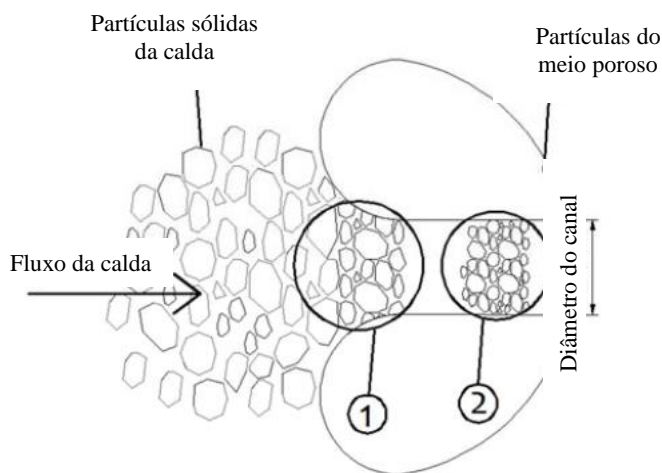


Figura 7.7 Formação de um entupimento à entrada de um vazio (1) e obstrução do poro (2). (Eklund & Stille, 2008; Jorne, 2016)

Evidentemente, as paredes de alvenaria antigas não apresentam a mesma porosidade ou volume de vazios em todo o seu volume, são meios bastante heterogêneos. Assim, é importante analisar o comportamento das caldas em diferentes meios sabendo que a calda vai sempre seguir o caminho de menor resistência.

7.6. Considerações finais

A temperatura, o tempo de repouso, pressão de injeção e o meio poroso onde se vai proceder à injeção da calda são todos fatores que influenciam de alguma forma a eficácia do procedimento de consolidação.

Em relação à temperatura, verifica-se que a temperatura ideal é entre os 20°C e os 30°C. Para temperaturas mais baixas, o aumento da tensão de cedência e viscosidade implicam uma menor fluidez da calda e uma menor capacidade de injeção. As temperaturas altas, por sua vez, aceleram o processo de evaporação de água e também da tensão de cedência diminuindo também a capacidade de ser injetada.

O tempo de repouso ideal para a injeção da calda no meio é o menor possível sendo que quanto maior o tempo de repouso, menor a sua capacidade de injeção. Este fator está bastante interligado com a temperatura pois quanto maior a temperatura, pior o desempenho da calda no estado fresco ao longo do tempo.

A pressão de injeção ideal é de 0,5 bar. Este valor pode variar tanto por excesso como por defeito, porém a variação demasiado acentuada pode provocar fenómenos de sob pressão causando danos estruturais na alvenaria. No entanto, com uma pressão menor do que 0.5 bar, o processo de injeção pode não ser eficaz não preenchendo o máximo de vazios pretendidos.

Por fim, o meio poroso onde se vai injetar a calda tem uma influência importante no tipo de calda que se vai injetar sendo que a dimensão dos materiais que se vão misturar dependem da dimensão e do tipo de material que se encontra na parede, desde à volumetria dos poros à sua permeabilidade.

8. Conclusão e desenvolvimento futuros

8.1. Conclusão

A reabilitação e conservação de edifícios antigos é uma atividade imprescindível para manter a caracterização histórica e arquitetônica das cidades. Neste trabalho, o método de consolidação de alvenarias antigas pela injeção de caldas foi estudado. É uma técnica muito eficiente para a consolidação de paredes estruturais dos edifícios antigos sem alterar o seu aspecto arquitetônico.

8.1.1. Análise das paredes de alvenaria

As paredes de alvenaria foram caracterizadas desde os materiais utilizados na sua concepção às diferentes técnicas de construção e classificação destas.

As paredes de alvenaria antiga podem ser compostas de pedras irregulares ou não, adobe, ou elementos cerâmicos, ligadas entre elas com argamassas ou não, e constituírem paredes com vários panos. Esta análise inicial permite distinguir quais as soluções de reforço executáveis em cada caso. As paredes de pano duplo ou triplo são as paredes que usualmente necessitam de uma consolidação das suas propriedades mecânicas pela técnica de injeção de caldas porque o material que se utilizava para preencher o pano interior era de uma qualidade fraca o que ao longo do tempo provoca a aparição de vazios que diminuem a sua capacidade resistente.

As principais anomalias que provocam a degradação das paredes ao longo do tempo foram descritas. Estas podem-se distinguir em dois grupos, as patologias estruturais e as patologias materiais que frequentemente influenciam uma e outra. As causas e características das anomalias encontradas em paredes de alvenaria são usualmente ligadas à fraca resistência à tração e esforços de flexão causadas, por sua vez, pelas características da argamassa que se foram fragilizando com o tempo. A presença de água é um fator que tende a acelerar esta degradação dos materiais com consequências estruturais ao conjunto composto por estes, ou seja, as paredes. Porém, um diagnóstico eficaz das anomalias nem

sempre é simples de se fazer. Para tal, diferentes técnicas de diagnóstico devem e podem ser utilizadas para concluir sobre o tipo de anomalias que se encontram na parede em estudo e as causas destas. As técnicas de diagnóstico podem ser destrutivas ou não e dependem muitas vezes das percepções sensoriais do técnico desde ao olfato, à audição e observação.

8.1.2. Técnica de injeção de caldas

A injeção de caldas é uma técnica de consolidação estrutural bastante eficaz se a parede intervencionada for bem analisada e o produto injetado adequado. Sendo uma técnica irreversível, estes fatores são de grande importância. Existem três formas de injetar as caldas nas paredes de forma a que a calda se distribua uniformemente: por gravidade, sob pressão ou por sucção. O processo de injeção é detalhado no segundo capítulo. Porém, a eficiência da injeção de caldas não depende só da técnica de injeção, depende muito do produto que se pretende inserir na parede, a calda. Para uma injeção de caldas eficaz, a calda deve assegurar certos requisitos físicos, químicos e mecânicos indicados posteriormente.

8.1.3. Constituição das caldas de injeção

As caldas são misturas de quatro elementos principais: o ligante, adições, adjuvantes e água. O ligante pode ser inorgânico ou orgânico sendo que a cal hidráulica é o ligante mais comum na injeção em edifícios antigos por ser o ligante contemporâneo mais próximo do utilizado originalmente compatibilizando assim com a alvenaria.

As adições permitem melhorar certas características da calda funcionando como adição ou substituto parcial do ligante. As adições podem ser naturais, não naturais resultando da produção de materiais industriais ou podem ser sintéticos apresentando as seguintes características:

- Adições naturais:
 - O metacaulino, para além de ser compatível quimicamente e mecanicamente, apresenta uma durabilidade maior, por outro lado, diminui a trabalhabilidade da calda.
- Adições não naturais
 - A sílica de fumo, escória de alto forno e cinzas volantes são adições que provêm de processos industriais. A elevada finura destas partículas aumenta a resistência mecânica e durabilidade das caldas enquanto que a presença de sílica, reagindo com a cal hidráulica resulta numa estrutura interna da calda significativamente mais compacta.
- Outras adições
 - Por fim, adições como fibras de polipropileno ou cinzas de casca de arroz melhoram a resistência mecânica das caldas.
 - O pó de tijolo aumenta as propriedades mecânicas e a durabilidade das caldas consequência da elevada superfície específica das partículas finas que o compõe.
 - O pó de pedra aumenta a compacidade e fluidez da calda. A introdução deste constituinte na calda tende a melhorar a resistência aos sais solúveis e diminuindo, por outro lado, a exsudação.

Os adjuvantes por sua vez são adicionados à mistura com o objetivo de melhorar a capacidade de injeção das caldas e de outras características da calda como reduzir a exsudação ou a estabilidade, melhorar a retenção de água, são uma maior valia para as características que se exige das caldas.

Por fim, a água e mais precisamente a quantidade de água utilizada na formulação de caldas é um fator considerável pois influência diretamente a fluidez da calda e a capacidade desta se manter coesa durante o processo de injeção. O rácio de água/ligante varia de caso para caso dependendo também dos adjuvantes utilizados na mistura.

8.1.4. Ensaio às caldas no estado fresco e endurecido

Após o estudo da constituição das caldas de injeção, são apresentados os diversos ensaios que devem ser feitos às caldas no seu estado fresco e endurecido de forma a conhecer e confirmar que as características reológicas, mecânicas e físicas das caldas em estudo são compatíveis com as paredes onde estas vão ser injetadas. Os diversos ensaios e resultados são assim descritos.

- Ensaio no estado fresco

A massa volúmica, a retenção de água, a injetabilidade e a estabilidade são ensaios que caracterizam as diferentes caldas de forma a obter resultados que, analisados e comparados, permitem tirar conclusões acerca das vantagens e desvantagens da adição ou utilização dos elementos que constituem a calda.

As propriedades reológicas das caldas podem ser obtidas laboratorialmente com viscosímetro ou reómetro ou no terreno com ensaios mais básicos como o cone de Marsh, o teste do espalhamento ou o método do perfil de velocidades. A técnica da injeção de caldas, como o nome indica, baseia-se na injeção de um líquido num meio poroso daí o estudo das características reológicas tornar-se imprescindível ao desenvolvimento da técnica.

- Ensaio no estado endurecido

Os ensaios no estado endurecido resultam na obtenção das propriedades mecânicas e físicas das misturas. Assim, como para as propriedades reológicas, os resultados dos ensaios de compressão e tração, aderência, do módulo de elasticidade e a resistência ao ataque por sais solúveis permitem criar uma base de comparação das características mecânicas entre as diferentes misturas que se pretendem estudar. Os ensaios de porosidade aberta, absorção de água por capilaridade, secagem e termogravimétricos indicam as propriedades físicas das caldas no seu estado endurecido.

8.1.5. Influência de fatores externos

Por fim, fatores exteriores que influenciam a técnica são explicitados como a influência da temperatura, do tempo de repouso, da pressão de injeção e as características do meio poroso onde se vai injetar.

A temperatura ideal para pôr em prática a técnica de injeção é entre os 20°C e os 30°C não tendo implicações negativas na fluidez da calda ou no processo de cura. O tempo de repouso é por sua vez influenciado pela temperatura daí que se considera que o tempo de repouso ideal é o menor tempo possível.

A pressão de injeção ideal, dependendo do meio onde se trabalha, ronda os 0,5bar pois pressões maiores podem causar sobre pressões que podem causar danos estruturais enquanto que pressões mais baixas podem não preencher na sua totalidade os vazios que se encontram na parede.

Por fim, o meio poroso também influencia tanto a pressão de injeção assim como a composição da calda, quanto mais poroso, mais facilmente escoar a calda.

8.2. Desenvolvimentos futuros

O desenvolvimento deste trabalho exigiu o estudo exaustivo de caldas de injeção. Vários trabalhos e estudos experimentais foram feitos sobre o tema. Porém, uma elevada variedade de fatores influenciam a eficácia do processo de injeção como processo de consolidação de paredes de alvenaria.

Assim, em primeiro lugar, para melhor compreender, avaliar e comparar resultados, o processo de amassadura das caldas e de todos os ensaios tanto reológicos como físicos e mecânicos devem ser normalizados. Isto permitiria retirar conclusões em função do ligante que se utiliza e a sua influência nas características das caldas.

É possível criar inúmeras formulações com diferentes percentagens e tipos de ligantes (cimento, cal hidráulica e aérea, sintéticos) cujos resultados podem ser promissores e permitir inovações no campo.

A utilização de adições que se podem acrescentar ou mesmo substituir às caldas para melhorar as características reológicas, mecânicas e de compatibilidade das caldas como as pozolanas naturais e os resíduos industriais carecem de estudos físicos, mecânicos, químicos e reológicos mais aprofundados que podem ser bastante interessantes.

A aderência entre a calda e o meio poroso é das características mais importantes na consolidação por injeção de caldas. Um estudo mais profundo da aderência com diferentes formulações pode resultar em dados interessantes.

A compatibilidade química, física e mecânica é também dos fatores mais importantes tendo em conta a irreversibilidade do procedimento porém, a avaliação da compatibilidade, sobretudo mecânica, é um tema interessante de se desenvolver com ensaios de compatibilidade entre diferentes caldas e paredes.

Referências bibliográficas

Aitcin, P. (1998). High performance concrete, Taylor & Francis Group, London, ISBN 978-0419192701 .

Almeida, C., Guedes, J. P., Arêde, A., Costa, C. Q., & Costa, A. (2012). *Physical characterization and compression tests o fone leaf stone masonry walls*. Construction and Building Materials, 30, 188-197.

Almeida, N.; Faria, P.; Ferreira Pinto, A. P. (2007). *Argamassas com Base em Cal Aérea e Cinzas de Casca de Arroz para Conservação do Património Construído*. 2.º Congresso Nacional de Argamassas de Construção, APFAC, Novembro de 2007.

Almeida, N. G., Gomes, A., & Ferreira Pinto, A. P. (2012). *Caldas de cal hidráulica para consolidação de alvenarias antigas. Influência da relação a/l e do tipo de cura*. 4º Congresso Português de Argamassas e ETICS. Coimbra.

Almeida, N. (2008). *Argamassas de cal aérea e cinza de casca de arroz para alvenarias antigas*. Tese Mestrado em Recuperação e Conservação do Património Construído, IST.

Alves, R. M. (2016). *Argamassas no Arquipélago da Madeira Caracterizção da “Brita Lavada”*. Dissertação para Obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Civil, Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa, Portugal.

Appleton, J. (2003): *Reabilitação de Edifícios Antigos- Patologias e Tecnologias de Intervenção*, Edições Orion.

Ashurst, J.; Ashurst, N. (1988). *Practical building conservation*, English Heritage Technical Handbook, Volume 1,2 &3, Gower Technical Press Ltd.

Assaad, J.J. (2015). *Correlating water extraction to viscosity variations of injection grouts*, Construction and Building Materials, vol. 77, pp. 74–82.

Baltazar, L.; Henriques, F.; Jorne, F. (2012). Optimisation of flow behaviour and stability of superplasticized fresh hydraulic lime grouts through design of experiments. Construction and Building Materials, Vol. 35, pp. 838–845.

Baltazar, L.; Henriques, F.; Jorne, F.; Cidade, M. (2014a). *Combined effect of superplasticizer, silica fume and temperature in the performance of natural hydraulic lime grouts*. Construction and Building Materials, Vol. 50, pp. 584–597.

Baltazar, L.; Henriques (2014b) *Rheology of grouts for masonry injection*. Key Engineering Materials vol 624, pp 283-290.

Baltazar L.G., Henriques F.M.A., Cidade M.T. (2015) *Contribution to the design of hydraulic lime-based grouts for masonry consolidation*. Journal of Civil Engineering and Management vol 21 (6): 698-709.

Barreto, C. (2010). *Durabilidade de argamassas de cal aérea e bastardas face à acção de sais solúveis*. Dissertação de Mestrado, Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa.

Binda, L.; Modena, C.; Baronio, G. (1993). *Strengthening of Masonries by Injection Technique*. Proc. 6th NAMC (North American Masonry Conference), Philadelphia.

Binda, L.; Modena, C.; Baronio, G.; Abbaneo, S. (1997). *Repair and investigation techniques for stone masonry walls*. Construction and Building Materials, Vol 11, pp. 133–142.

Binda, L.; Saisi, A.; Tiraboschi, C. (1999). *Flat-jack test: a Slightly destructive technique for the diagnosis of brick and stone masonry structures*. International Journal for Restoration of Buildings and Monuments, Int. Zeitschrift fur Bauinstandsetzen und Baudenkmalfpflege, Zurich, 449-472.

Binda, L.; Saisi, A.; Tiraboschi, C. (2000). *Investigation procedures for the diagnosis of historic masonries*. Construction and Building Materials, V 14, pp. 199–233.

Binda, L.; Saisi, A. (2001). *Non destructive testing applied to historic buildings: The case of some Sicilian Churches*, Historical Constructions, Lourenço P. B. and Roca P. (eds), Guimarães.

Binda, L.; Saisi, A. & Tedeschi, C. (2006). *Compatibility of materials used for repair of masonry buildings: research and applications*, Fracture and Failure of Natural Building Stones- Applications in the Restoration of Ancient Monuments, Part I, Stavros k. Kourkoulis Editor, Elsevier.

Botas, S.; Rato, V. (2010). *Influência da introdução de ar no comportamento de argamassas aos ciclos gelo/degelo*. Atas do 3º Congresso Português de Argamassas de Construção. Lisboa.

Botas, J. (2019). *Grouts de cal hidráulica natural incorporando fibras de polipropileno e microesferas de vidro: caracterização física e mecânica*. Dissertação de Mestrado, Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa.

Branco, F., Brito, J. de, Ferreira, J. G., & Flores, I. (2014a). *Patologia da Alvenaria de Pedra*. Patologia e Reabilitação da Construção. Instituto Superior Técnico. Universidade de Lisboa.

Branco, F., Brito, J. de, Ferreira, J. G., & Flores, I. (2014b). *Técnicas de reabilitação de alvenarias*. Patologia e Reabilitação da Construção. Instituto Superior Técnico. Universidade de Lisboa, Lisboa.

Brás, A., & Henriques, F. M. A. (2011). *Natural hydraulic lime based grouts – The selection of grout injection parameters for masonry consolidation*. Construction and Building Materials, vol 26(1), pp 135–144.

Brás, A. (2011). *Grout optimization for masonry consolidation*, Tese de Doutoramento, Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa.

Bras, A.; Henriques, F. (2012). *Natural hydraulic lime based grouts – The selection of grout injection parameters for masonry consolidation*. Construction and Building Materials, Vol 26, pp. 135–144.

Bras, A.; Henriques, F.; Cidade, M. (2010). *Effect of environmental temperature and fly ash addition in hydraulic lime grout behaviour*. Construction and Building Materials, Vol 24, pp. 1511–1517.

Cardoso, F. A., John, V. M., Pileggi, R. G., e Banfill, P. F. G. (2014). *Characterisation of rendering mortars by squeeze-flow and rotational rheometry*. Cement and Concrete Research, vol 57, pp 79–87.

Cardoso, T. (2015). *Influência da exsudação e da perda de água nas propriedades reológicas de grouts*, Dissertação para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Civil, Faculdade de Ciências e Tecnologias da Universidade Nova de Lisboa, Almada.

Carneiro, J. (2012). *Caracterização de argamassas de cal hidráulica natural com metacaulino Orientadora : Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa*, Dissertação para obtenção do grau Mestre em Engenharia Civil, Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa, Almada.

Casella, G. (1998). *Diálogos de Edificação*, Edição- Centro Regional de Artes Tradicionais, ISBN 972941923X

Casella, G. (2003). *Gramáticas de Pedra- Levantamento de tipologias de construção murária*, Edição- Centro Regional de Artes Tradicionais.

Chandrasekhar, S.; et al. (2003). *Review. Processing, properties and applications of reactive silica from rice husk – an overview*. Journal of Materials Science, vol 38, pp 3159- 3168.

Coelho, J. (2013). *Avaliação da injeção de grouts em alvenarias antigas com ensaios não destrutivos*. Dissertação para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Civil, Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa, Almada.

Cóias, V. (2006). *Inspeções e Ensaios na Reabilitação de Edifícios*, IST, ISBN: 978-97284-6953-5

Colagelo, F., Roviello, G., Ricciotti, L., Ferrándiz-Mas, V., Messina, F., Ferone, C., Tarallo, O., Cioffi, R., & Cheeseman, C. R. (2018). *Mechanical and thermal properties of lightweight geopolymer composites*. Cement and Concrete Composites, 86, 266-272.

Colleparidi, M. (1990). *Degradation and Restoration of Masonry Walls of historical buildings*, Materials and Structures, vol (23) pp 81-102.

Correia, J. (2011). *Análise Experimental de um murete de alvenaria de pedra tradicional de grandes dimensões*. Dissertação para obtenção do grau Mestre em Eng. Civil, Fac. Ciências e Tecnol. da Univ. Nov. Lisboa, Almada.

Dias, N. A. (2012). *Geopolímeros: Contributos para a redução das eflorescências*. Dissertação de Mestrado Integrado em Engenharia Civil, Universidade do Minho, Escola de Engenharia, Portugal.

Eklund, D.; Stille, H. (2008). *Penetrability due to filtration tendency of cement-based grouts*. Tunnelling and Underground Space Technology, Vol 23, pp 389–398.

Faria, P. (2004). *Argamassas de revestimento para alvenarias antigas: Contribuição para o estudo da influência dos ligantes*. Tese de Doutoramento, Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa.

Faria, P., Silva, V. & Grilo, J. (2012) *Argamassas compatíveis com alvenarias históricas com base em cal hidráulica natural*, Clrea2012 - Int. Conf. Rehabil. Old Mansories, Universidade Nova de Lisboa, pp. 29–38.

Figueiredo (2013). *Caldas de Injecção Pré-doseadas para Alvenarias Antigas Estudo da Aderência*, Dissertação para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Civil, Faculdade de Ciências e Tecnologias da Universidade Nova de Lisboa, Almada, p. 192.

Fernandes, M. F. & Lourenço P. (2007). *Aplicações do georadar na reabilitação e detecção de anomalias*, Congresso Construção 2007. 3º Congresso Nacional, Coimbra.

Ferraris, C. (1999). *Measurement of the rheological properties of high performance concrete: State of the art report*, J. Res. Natl. Inst. Stand. Technol., vol. 104, no. 5, p. 461.

Ferraris, C. & Hackley, V. (2001). *The use of Nomenclature in Dispersion Science and Technology*, National Institute of Standards and Technology, Special Publication vol 960-3, pp43-44.

Fontes, T. I. M. (2013). *Argamassas de cal hidráulica natural NHL3.5 de fabrico nacional: otimização de características com resíduo cerâmico e metacaulino*, Diss. para obtenção do grau Mestre em Eng. Civil, Fac. Ciências e Tecnol. da Univ. Nov. Lisboa, Almada, p. 177.

Gemert, V.; Dionys, A.; Brosens, K.; Toumbakari, E. (2015). *Consolidation and Strengthening of Historical Masonry by Means of Mineral Grouts: Grout Development*. Restoration of Buildings and Monuments vol 21, pp 29 - 45.

Gil, N.P. (1994). *Grouting as a repair and strengthening technique to historic masonry buildings*. Master thesis of Conservation of Historic Towns and Buildings. Katholieke Universiteit Leuven.

Glukhovskiy, V. D., Rostovskaja, G. S., Rumyna, G. V.(1980). *High strength slag-alkaline cements*. 7th International Congress Chemical Cement, Vol.3, Paris, Theme 5, 164 – 168, 1980.

Gomes, J. (2016). *Caracterização experimental do comportamento reológico e mecânico de grouts com hidrófugo vegetal*, Dissertação para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Civil, Faculdade de Ciências e Tecnologias da Universidade Nova de Lisboa, Almada.

Gouveia, T. (2017). *Grouts de injeção com nanopartículas de sílica na consolidação de alvenarias antigas*, Dissertação para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Civil, Faculdade de Ciências e Tecnologias da Universidade Nova de Lisboa, Almada.

Guerreiro, C.; Henriques, F. M. A.; Pinto, A. P. (2007). *Análise comparativa de argamassas de cal aérea, medianamente hidráulicas e de ligantes mistos para rebocos de edifícios antigos*. 2º Congresso Nacional de Argamassas de Construção, 22-23 Novembro, Auditório I da FIL, Parque das Nações, Lisboa.

Guerreiro, J. (2014). *Avaliação do efeito combinado de temperatura, tempo de repouso e pressão de injeção na eficiência de injeção de grouts*, Dissertação para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Civil, Faculdade de Ciências e Tecnologias da Universidade Nova de Lisboa, Almada.

Icomos (2004). *Recomendações para a análise, conservação e restauro estrutural do património arquitectónico*. International Council on Monuments and Sites.

Jeffs, A. (2001): *Core Consolidations of Heritage Structure Masonry Walls and Foundations using Grouting Techniques- Canadian Case Studies*, 9th Canadian Masonry Symposium, Canada.

Jorne, F. (2014). *Comunicação particular*. Departamento Engenharia Civil da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa, Lisboa.

Jorne, F.; Henriques, F. M. A. & Baltazar, L. G. (2012). *Grout injection in porous media with different internal structures*, in Proceedings of the 14th International Conference - Structural Faults & Repair.

Jorne, F., & Henriques, F. M. A. (2016). *Evaluation of the grout injectability and types of resistance to grout flow*. Construction and Building Materials, vol 122, pp171–183.

Jorne, F., Henriques, F. M. A., & Baltazar, L. G. (2012). *Análise das propriedades de grout endurecido*. 4o Congreso de Patología Y Rehabilitación de Edificios.

Jorne, F., Henriques, F. M. A., & Baltazar, L. G. (2015). *Evaluation of consolidation of different porous media with hydraulic lime grout injection*. Journal of Cultural Heritage, vol 16, pp 438-451.

Jorne, F., Henriques, F. M. A., & Baltazar, L. G. (2015). *Influence of superplasticizer, temperature, resting time and injection pressure on hydraulic lime grout injectability. Correlation analysis between fresh grout parameters and grout injectability*. Journal of Building Engineering, 4, 140–151.

Jorne, F., Henriques, F. M. A., & Baltazar, L. G. (2015). *Injection capacity of hydraulic lime grouts in different porous media*. Materials and Structures, 48, 2211–2233.

Kestin, J.; Sokolov, M.; WAKEHAM, W. (1978). *Viscosity of liquid water in the range –8 °C to 150 °C*. Journal of Physical and Chemical Reference Data, Vol 7, pp. 941.

Kong, D., Corr, D. J., Hou, P., Yang, Y., & Shah, S. P. (2015). *Influence of colloidal silica sol on fresh properties of cement paste as compared to nano-silica powder with agglomerates in micron-scale*. Cement and Concrete Composites, vol 63, pp30–41.

Lei, W.G.; Struble, L. (2005). *Microstructure and Flow Behavior of Fresh Cement Paste*. Journal of the American Ceramic Society, Vol 80, pp. 2021–2028.

Lombillo, I., Villegas, L. C. (2013). *Non (minor) Destructive Methodologies applied to the Study and Diagnosis of Masonry Structures of the Built Heritage*, Cib W086, 2013.

Luso, E. (2002): *Contribuição para Intervenções no Centro Histórico de Bragança*, Tese de Mestrado, Universidade do Minho.

Luso, E. (2012). *Análise Experimental de Caldas à Base de Cal para Injeção de Alvenaria Antiga*, Ph.D. thesis, Univ. do Minho.

Luso, E. & Lourenço, P. B. (2014). *Formulação de Caldas à base de Cal para Injeção de Alvenaria Antiga*. 9º Congresso Nacional de Mecânica Experimental, Aveiro, 15-17 Outubro

Luso, E., Lourenço, P. B. & Ferreira, R. M. (2007). *Injeções para consolidação de construções em terra*. Revisão do conhecimento e métodos de ensaio. 5º Seminário de Arquitectura de Terra em Portugal. Aveiro.

Maierhofer, C.; Ziebolz, A.; Köpp C.; (2003). *A European Research Project: On-site investigation techniques for the structural evaluation of historic masonry*. Federal Institute for Materials Research and Testing (BAM), Berlin, Germany.

Mana A. (2013). *Influência das cinzas volantes não conformes em argamassas de cal aérea*, Dissertação para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Civil, Faculdade de Ciências e Tecnologias da Universidade Nova de Lisboa, Almada.

Martins de Almeida, S. (2012). *Análise do módulo de elasticidade estático e dinâmico do concreto de cimento Portland através de ensaios de compressão simples e de frequência ressonante*, Dissertação para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Civil, Universidade Federal de Minas Gerais, Brasil.

Marques Silva, D. (2010). *Optimização de caldas de cimento para trabalhos de injeção em Geotecnia*, Dissertação para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Civil, Instituto Superior de Engenharia de Lisboa.

Metha, P.K. (1983). *Pozzolanic and Cementitious byproducts as mineral admixtures for concrete – A critical Review*. Proc. First Int. Conf. on the Use of Fly Ash, Silica Fume, Slag and Other Mineral By-products in Concrete. Montebello, Canada, 1-46.

Metrogos, S. (2016). *Caldas de injeção para alvenarias antigas. Protocolo de ensaio para o estudo da reologia*, Dissertação para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Civil, Técnico de Lisboa.

Miltiadou-Fezans, A. (1990). *Contribution à l'étude des coulis hydraulique pour la réparation et le renforcement des structures et des monuments historiques en maçonnerie*. PhD Thesis ENPC Paris.

Miltiadou-Fezans, A.; Tassios, T.P. (2012). *Fluidity of hydraulic grouts for masonry strengthening*. Materials and Structures, Vol 45, pp 1817–1828.

Miltiadou-Fezans, A.; Tassios, T.P. (2013a). *Penetrability of hydraulic grouts*. Materials and Structures, Vol 46, pp. 1653–1671.

Miltiadou-Fezans, A.; Tassios, T.P. (2013b). *Stability of hydraulic grouts for masonry strengthening*. Materials and Structures, Vol 46, pp. 1631–1652.

- Miranda, L. (2011). *Ensaaios acústicos e de macacos planos em alvenarias resistentes*. Tese de Doutouramento, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.
- Nair, D.G., et al. (2007). *A structural investigation relating to the pozzolanic activity of rice husk ashes*, Cement and Concrete Research, Vol 38.
- Nehdi, M, et al. (2003). *Performance of rice husk ash produced using a new technology as a mineral admixture in concrete*. Cement and Concrete Research, vol 33, pp1203-1210.
- Nobre Miguel, D. (2017). *Influência do tipo e dosagem de hidrófugo na reologia de caldas de injeção*, Dissertação para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Civil, Faculdade de Ciências e Tecnologias da Universidade Nova de Lisboa, Almada.
- Osborne, G. J. (1999). *Durability of Portland blast furnace slag cement concrete*, Cement and Concrete Composites, vol 21: pp. 11-21.
- Paillère, A.; Bem Bassat, M.; Akman, S. (1992). *Guide for use of admixtures in concrete*, Materials and Structures, vol (25): pp 49-56.
- Paillère, A.-M.; Guinez, R. (1984). *Recherche d'une formulation de coulis a` base de liants hydrauliques pour l'injection dans les fines fissures et les cavité's*. Bulletin de liaison des Laboratoires des Ponts et Chaussées, Paris, no 130, pp 51–57.
- Paillère, A.-M.; Rizoulirres, Y. (1978). *Réparation des structures en béton par injection de polymères*. Bulletin de Liaison des Laboratoires des Ponts et Chaussées vol 96: pp 17–23.
- Paiva, H.; Silva, L.M.; Labrincha, J.A.; Ferreria, V.M. (2005). *Efeito de Adjuvantes Sobre a Reologia de uma Argamassa*. Universidade de Aveiro.
- Paiva, M. (2015): *Argamassas de Cal Hidráulica para Reabilitação de Edifícios*, Tese de Mestrado, Instituto Superior de Engenharia de Lisboa.
- Páscoa, L. (2012). *Índice de secagem como parâmetro em serviço dos rebocos aplicados em paredes exteriores*. Dissertação de Mestrado, Universidade Técnico de Lisboa.
- Perret, S.; Khayat, H.; Gagnon, E.; Rhazi, J. (2002). *Repair of 130- year old Masonry Bridge using High-Performance Cement Grout*, Journal of Bridge Engineering, Vol 7(1): pp 31-38.
- Perret, S.; Ballivy, G.; Palardy, D.; Laporte, R. (2003). *Formulation of high-performance cement grouts for the rehabilitation of heritage masonry structures*, Third International Conference On Grouting and Grout Treatment, New Orleans, Louisiana.
- Pinho, F. F. S. (2000). *Paredes de edifícios antigos em Portugal*, LNEC, ISBN: 972-4918645
- Pinho, F. F. S. (2007) – *Paredes de alvenaria ordinária. Estudo experimental com modelos simples e reforçados*. Tese de doutoramento, Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa.

Pinto, A. (2004). *Sistemas ligantes obtidos por ativação alcalina do metacaulino*, Tese de doutoramento, Universidade do Minho, Guimarães.

Rahman, M. (2015). *Rheology of cement grout – Ultrasound based in-line measurement technique and grouting design parameters*, Tese de doutoramento, KTH Royal Institute of Technology, Suécia.

Rato, V. (2006). *Influência da microestrutura morfológica no comportamento das argamassas*. Tese de Doutoramento, Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa.

Rickstal, F. V. (2000). *Grout injection of masonry*. PhD Thesis in Civil Engineering, Katholieke Universiteit Leuven.

Rodrigues, João Paulo C., Susana O. (2008). *O Spalling nas estruturas de Betão*, Guimarães: BE2008, Novembro de 2008.

Roque, J. (2002): *Reabilitação Estrutural de Paredes Antigas de Alvenaria*, Tese de mestrado, Universidade do Minho.

Rosquoët F., Alexisb A., Khelidjb A. (2003). *Experimental study of cement grout: rheological behavior and sedimentation*, Cement and Concrete Research, vol 33 (5), pp 713-722.

Roussel, N.; Le Roy, R. (2005). *The Marsh Cone: a test or a rheological apparatus?*, Cement and Concrete Research vol (35): pp823-830.

Santos, P. (2013). *Estudo da utilização de escória de alto forno como agregado graúdo em concretos fabricados em Marabá*, Tese de mestrado, Universidade Federal do Pará, Brasil.

Seabra M. P.; Paiva H.; Labrincha J. A.; Ferreira V.M. (2007). *Efeito dos adjuvantes no comportamento reológico de argamassas de cal aérea*, APFAC, Congresso 2007.

Senff, L., Hotza, D., & Repette, W. (2010). *Comportamento reológico de pastas de cimento com adição de sílica ativa, nanossílica e dispersante policarboxílico*. Revista Matéria, vol 15(1), pp12–20.

Sequeira, A. C., Frede, D., & Gonçalves, P. (2007). *Cal Hidráulica – Um ligante para a reabilitação*. Martingança, Secil.

Shannag, M. (2002). *High-Performance Cementious grouts for Structural Repair*, Cement and Concrete research, vol (32): pp803-808.

Silva, B.; Dalla Benetta, M.; da Porto, F.; Modena, C. (2014a). *Experimental assessment of in-plane behaviour of three-leaf stone masonry walls*. Construction and Building Materials, Vol 53, pp. 149–161.

Silva, B.; Pigouni, A.E.; Valluzzi, M.R.; Modena, C. (2014b). *Calibration of analytical formulations predicting compressive strength in consolidated three-leaf masonry walls*. Construction and Building Materials, vol 64, pp 28–38.

Silva, R. (2008). *Caracterização experimental de alvenaria: reforço e efeitos diferidos*, Tese de Mestrado, Universidade do Minho.

Sousa, S. P. B. (2005). *Betões eco-eficientes com cinza de casca de arroz*, tese de mestrado, FEUP.

Takeda, Y. (1995). *Velocity Profile Measurement by Ultrasonic Doppler Method*. Experimental Thermal and Fluid Science, vol 10: pp 444-453.

Temporão, D. (2019). *Grouts à base de geopolímero e cal hidráulica natural para a consolidação de alvenarias antigas*, Dissertação de Mestrado, Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa.

Temuujin, J., van Riessen, A., & Williams, R. (2009). *Influence of calcium compounds on the mechanical properties of fly ash geopolymer pastes*. Journal of Hazardous Materials, 167, 82-88.

Tkach, E. V., 'Semenov, V. S., Tkach, S. A. and Rozovskaya, T. A. (2015). *Highly effective water-repellent concrete with improved physical and technical properties*, Procedia Eng., vol. 111, no. TFOCE, pp. 763–769.

Torres, Faria, P. & Matias, G. (2014). *Incorporação de resíduos de cerâmica em argamassas de cal aérea*, Construlink, vol. 35(12), pp. 4–15.

Toumbakari, E. (2002). *Lime-Pozzolan-Cement Grouts and their Structural Effects on Composite Masonry Walls*, PhD Thesis, Department of Civil Engineering, Katholieke Universiteit Leuven, Belgium.

Toumbakari, E.-E.; Van Gemert, D.; Tassios, T.P. (1999). *Methodology for the design of injection grouts for consolidation of ancient masonry*, in: International RILEM Workshop on Historic Mortars: Characteristics and Tests.

Toumbakari, E.-E.; Van Gemert, D.; Tassios, T.P.; Tenoutasse, N. (1999). *Effect of mixing procedure on injectability of cementitious grouts*. Cement and Concrete Research, Vol 29, pp 867–872.

Valluzzi, M. (2005). *Requirements for the choice of mortar and grouts for consolidation of three-leaf stone masonry walls*. Delft University of Technology, Faculty of Civil Engineering and Geosciences.

Valluzzi, M. (2000). *Comportamento Meccanico di Murature Consolidate Con Materiali e Tecniche a Base di Calce*, Tesi de Dottorato, Università Degli Studi di Trieste.

Valluzzi, M.R.; Da Porto, F.; Modena, C. (2004). *Behavior and modeling of strengthened three-leaf stone masonry walls*. Materials and Structures, Vol 37, pp 184–192.

Valluzzi, M.R.; Mazzon, N.; Munari, M.; Casarin, F.; Modena, C. (2009). *Effectiveness of injections evaluated by sonic tests on reduced scale multi-leaf masonry building subjected to seismic actions* Résumé. NDTCE'09pp 2–7.

Van Rickstal, F. (2000). *Grout injection of masonry, scientific approach and modeling*. Doctoral Thesis, Katholieke Universiteit Leuven.

Van Rickstal, F. (2001). *Grout injection of masonry, scientific approach and modeling*. International Journal for Restoration of Buildings and Monuments, Vol 7(34): 407-432.

Van Rickstal, F.; Toubakari, E.-E.; Ignoul, S.; Van Gemert, D. (2003). *Development of mineral grouts for consolidation injection*. In Consolidation of Masonry, Ed. D. Van Gemert, Advances in Materials Science and Restoration, vol 1 pp. 61-75.

Veiga, R. & Santos, A. R. (2015). *As argamassas de cal hidráulica natural na reabilitação*, Rev. Pedra Cal, vol. 58, pp. 38–40.

Velosa, A. (2006). *Argamassas de cal com pozolanas para revestimento de paredes antigas*. Tese de doutoramento, Universidade de Aveiro.

Velosa, A., Rocha, F., Haugen, A. (2013). *Mortars in Norway from the Middle Ages to the 20th Century: conservation strategy*, Built Heritage 2013, Milan, Italy, November.

Vicente, R., Silva, J. (2009). *Caracterização mecânica de paredes de alvenaria em construções antigas - Ensaíos com macacos planos*. Revista Internacional Construlink, 05/2009.

Vintzileou, E. (2006). *Grouting of three-leaf masonry: types of grouts, mechanical properties of Masonry before and after Grouting*, Structural Analysis of Historical Construtions, Lourenço P. B., Roca P., Modena C., Agrawal S. (eds), New Delhi.

Vintzileou, E. (2007). *Grouting of three-leaf masonry: experimental results and prediction of mechanical properties*, Evol. nella Sper. per le Costr., no. April, pp. 171–190.

Wallevik, J.E. (2005). *Thixotropic investigation on cement paste: Experimental and numerical approach*. Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics, Vol 132, pp. 86–99.

Wallevik, J.E. (2009). *Rheological properties of cement paste: Thixotropic behavior and structural breakdown*. Cement and Concrete Research, Vol 39, pp 14–29.

Normas

ASTM C1403-06 (2006). *Standard Test Method for Rate of Water Absorption of Masonry Mortars*, ASTM International, West Conshohocken, PA.

ASTM C267-01 (2012). *Standard Test Methods for Chemical Resistance of Mortars, Grouts, and Monolithic Surfacing and Polymer Concretes*, ASTM International, West Conshohocken, PA.

ASTM C597-02 (2002). *Standard Test Method for Pulse Velocity Through Concrete*, ASTM International, West Conshohocken, PA.

ASTM C939-02 (2002). *Standard Test Method for Flow of Grout for Preplaced-Aggregate Concrete (Flow Cone Method)*, ASTM International, West Conshohocken, PA.

ASTM C941-02 (2002). *Standard Test Method for Water Retentivity of Grout Mixtures for Preplaced-Aggregate Concrete in the Laboratory*, ASTM International, West Conshohocken, PA.

ASTM C942-10 (2010). *Standard Test Method for Compressive Strength of Grouts for Preplaced-Aggregate Concrete in the Laboratory*, ASTM International, West Conshohocken, PA.

ASTM C943-10 (2010). *Standard Practice for Making Test Cylinders and Prisms for Determining Strength and Density of Preplaced-Aggregate Concrete in the Laboratory*, ASTM International, West Conshohocken, PA.

ASTM C952-12 (2012). *Standard Test Method for Bond Strength of Mortar to Masonry Units (Withdrawn 2018)*, ASTM International, West Conshohocken, PA.

ASTM C953-10 (2010). *Standard Test Method for Time of Setting of Grouts for Preplaced-Aggregate Concrete in the Laboratory*, ASTM International, West Conshohocken, PA.

ASTM D4016-14 (2014). *Standard Test Method for Viscosity and Gel Time of Chemical Grouts by Rotational Viscometer (Laboratory Method)*, ASTM International, West Conshohocken, PA.

CEN (1999) EN 1015-11: Methods of test for mortar for masonry, part 11. Determination of flexural and compressive strength of hardened mortar.

CEN (1999) EN 12370. *Natural stone test methods. Determination of resistance to salt crystallization*. Brussels, European Committee for Standardization.

CEN (2002) EN 1015-18. *Methods of test for mortar for masonry, part 18. Determination of water absorption coefficient due to capillary action of hardened mortar*. Brussels, European Committee for Standardization.

CEN (2013) EN 16322. *Conservation of cultural heritage. Test methods. Determination of drying properties*. Brussels, European Committee for Standardization.

EN 1015-6 (1999). *Methods of test for mortar for masonry. Determination of bulk density of fresh mortar*, Norma Inglesa.

IPQ (2008) NP EN 1936: Métodos de ensaio para pedra natural. Determinação das massas volúmicas real e aparente e das porosidades total e aberta.

NF P 18-891 (1986). *Produits spéciaux destines aux constructions en béton hydraulique – Produits pour injections dans des structures en béton – Essai d’injectabilité à la colonne de sable en milieux sec et humide*, Norma francesa.

NP EN 196-3 (2005). Métodos de ensaio de cimentos Parte 3: Determinação do tempo de presa e da expansibilidade, Norma portuguesa.

NP EN 445 (2008). *Caldas de injeção para armaduras de pré-esforço – Métodos de ensaio*, Norma portuguesa.

NP EN 447 (2008). *Caldas de injeção para armaduras de pré-esforço – Especificações para caldas correntes*, Norma portuguesa.

Referências eletrónicas

W1: <http://minasdoparanapanema.blogspot.com/2017/06/cantaria-arte-de-trabalhar-as-pedras.html> (16/10/2019)

W2: <https://portalconstrucaofacil.com/alvenaria/> (02/07/2019)

W3: <https://www.ecivilnet.com/dicionario/o-que-e-alvenaria-de-pedra-seca.html> (02/07/2019)

W4: https://pt.slideshare.net/joao_neves/tcnica-de-execuo-de-paredes-de-pedra-41822605 (02/07/2019)

W5: <https://pt.slideshare.net/abianchipaula/arquitetura-do-brasil-adobeequipe-14> (08/07/2019)

W6: <https://aclweb.pt/pt/produtos/outro-bet-o/blocos-de-alvenaria> (08/07/2019)

W7: <http://www.ceramicaroque.com.br/web/produto/bloco-tijolo-vedacao-14-cm/bloco-tijolo-vedacao-14x19x29-cm-bloco-inteiro> (08/07/2019)

W8: <https://pxhere.com/pt/photo/1093433> (15/07/2019)

W9: <https://www.jroma.pt/fissuras-e-deslocamentos.html> (12/07/2019)

W10: <https://www.progenie-engineering.com/wp-content/uploads/2015/01/FT91.pdf?x17288> (12/07/2019)

W11: https://produto.mercadolivre.com.br/MLB-719667754-camera-inspeco-boroscopica-1m-82-mm-35-lcd-foto-e-video-_JM (12/07/2019)

W12: <http://www.oz-diagnostico.pt/fichas/1F%20011.pdf> (24/07/2019)

W13: <http://reabilitar2010.Inec.pt/pdf/curso/AnibalCosta.pdf> (24/07/2019)

W14: <https://www.amazon.es/Fetanten-Humid%C3%ADmetro-Construcci%C3%B3n-Detector-Sheetrock/dp/B075HB8VSC> (24/07/2019)

W15: <http://www.ni.com/pt-br/innovations/white-papers/06/measuring-vibration-with-accelerometers.html> (24/07/2019)

W16: <https://www.dsicanada.ca/projects/2009-info-17/efficient-repair-with-dsi-vacuum-grouting-on-the-jamestown-verrazano-bridge/> (26/08/2019)

W17: <https://pt.slideshare.net/Ingenheiro/termografia-edificios> (18/08/2019)

W18: <http://www.peritagemdeedificios.com/termografia.html> (18/08/2019)

W19: <https://www.georadarchile.cl/servicios.html> (16/10/2019)

W20:
https://civil.fe.up.pt/pub/apoio/ano1/CienciaDosMateriais/apontamentos/teorica_20022003/JSC_031a043.pdf

W21: https://produto.mercadolivre.com.br/MLB-948701523-areia-pedra-brita-po-de-pedra-pedrisco-a-granel-metro-_JM (02/07/2019)

W22: <https://cegielniatrojanowscy.pl/en/milled-clay-and-brick-powder/> (02/07/2019)

W23: https://pt.made-in-china.com/tag_search_product/Microsilica-Fume_oerssen_1.html (02/07/2019)

W24: <http://paraferro.com.br/mobile/conteudo.php?go=69&file=a-fabricacao-do-aco.html> (02/07/2019)

W25: <https://www.sephakucement.co.za/Product-Ash.php> (02/07/2019)

W26: <https://www.neomatex.com.br/fibra-polipropileno.html> (02/07/2019)

W27: <https://www.indiamart.com/proddetail/rice-husk-ash-4217927062.html> (02/07/2019)

W28: <https://www.braseq.com.br/viscosimetro-brookfield> (18/08/2019)

W29: <https://www.malvernpanalytical.com/br/products/category/rheometers> (18/08/2019)

W30: https://www.researchgate.net/figure/Figura-3-Funil-de-Buechner-modificado-Fonte-Carasek-2007_fig1_280945005 (10/08/2019)

W31: <https://contenco.com.br/produto/aparelho-para-medir-retencao-de-agua-em-argamassas-metodo-do-funil-de-buchner-i-3003-g/> (10/08/2019)

W32: http://www.scielo.br/scielo.php?pid=S1983-41952015000300323&script=sci_arttext&tlng=pt (10/08/2019)

W33: https://www.researchgate.net/publication/320881559_ARGAMASSA_E_CONCRETO_COM_RESIDUOS_DE_MARMORES_E_GRANITOS_-_MORTAR_AND_CONCRETE_WITH_MARBLE_AND_GRANITE_RESIDUOS (10/08/2019)

W44: <https://www.eqs-global.com/pt/inspecao-e-controlo-de-qualidade/inspecoes-de-engenharia-civil/ensaios-para-betao-madeira-e-argamassas/impacto-eco-ie> (20/09/2019)

W45: <https://maquinadeaprovacao.com.br/engenharia/edificacoes-patologia-das-edificacoes/> (26/12/2019)

W46: <https://www.novatest.it/> (20/12/2019)

W47: <http://www.sinergeo.pt/o-uso-do-georadar-como-ferramenta-geofisica-nao-destrutiva/> (19/08/2019)

W48: <https://tecnomor.com.br/blog/aditivo-acelerador-solucao-para-a-cura-do-concreto-em-baixas-temperaturas/> (26/12/2019)

W49: https://www.researchgate.net/publication/278305080_Comportamento_do_concreto_autoadensavel_com_po_de_carnauba_submetido_a_condicoes_naturais_e_aceleradas_analise_da_absorcao_de_agua_por_imersao_por_capilaridade_e_permeabilidade_a_agua_sob_pressao/figures?lo=1 (26/12/2019)